Н. В. Никулин

Электро-материаловедение

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Одобрено Ученым советом Государственного комитета СССР по профессионально-техническому образованию в качестве учебника для средних профессионально-технических училищ



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
1984

ББК 31.23
Н65
УДК 621.315

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю. В Зайцев
(Московский энергетический институт)

Никулин Н. В.

Н65 Электроматериаловедение: Учебник для сред. проф.-техн. училищ. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 1984. — 175 с., ил. — (Профессионально-техническое образование).

20 к.

В книге в сжатой и доступной форме описываются основные свойства широко применяемых электротехнических материалов электроизоляционных, проводниковых полупроводниковых и магнитных. Во второе издание введена новая глава, в которой изложены основные свойства сверхпроводников и криогенных проводников

Книга может быть использована при профессиональном обучении рабочих на производстве

Н $\frac{2302020000-171}{052(01)-84}$ 19—84

ББК 31.23
6П2.1.06

ВВЕДЕНИЕ

В Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года большое внимание уделено дальнейшему развитию энергетики, являющейся базой для всех отраслей народного хозяйства. Так, большое развитие получают работы по формированию единой энергетической системы СССР и сверхдальних линий электропередачи на весьма высокие напряжения: 750, 1150 и 1500 тыс. вольт, строительству новых тепловых, гидроэлектрических и атомных электростанций. Успешное осуществление проектов дальнейшей электрификации всех отраслей народного хозяйства зависит от технического уровня электротехнической промышленности СССР. Она должна освоить производство турбогенераторов мощностью 1000—1500 тыс. киловатт, разработать и выпустить высоковольтное оборудование для линий электропередачи на напряжения до 1150 тыс. вольт переменного и до 1500 тыс. вольт постоянного тока. Будет совершенствоваться производство электрических машин, электрических аппаратов и приборов с улучшенными характеристиками.

Возросшие требования к технико-экономическим показателям и эксплуатационной надежности мощных турбо- и гидрогенераторов, трансформаторов, электродвигателей и другого электрооборудования в настоящее время удовлетворяются с помощью различных электротехнических материалов. Разработка и выпуск современного оборудования для новой техники в значительной степени зависят от применения прогрессивных материалов. Только рациональный выбор соответствующих материалов позволит создать прогрессивные виды электрооборудования с повышенными удельными характеристиками и высокой эксплуатационной надежностью.

Приведенные в учебнике сведения помогут будущим молодым рабочим в рациональном выборе и применении соответствующих электротехнических материалов в производстве электрических машин. аппаратов, приборов.

ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

§ 1. Классификация и назначение электротехнических материалов

Электротехнические материалы – это специальные материалы, из которых изготовляют электрические машины, аппараты, приборы и другие элементы электрооборудования и электроустановок. Все электротехнические материалы обычно делят на четыре основные группы: электроизоляционные (диэлектрики), проводниковые, полупроводниковые (полупроводники) и магнитные.

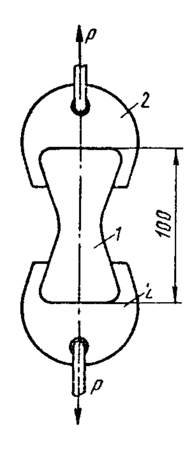
Известно, что надежность работы электрических машин, аппаратов и установок зависит от качества и правильного выбора соответствующих электротехнических материалов.

При рациональном выборе электроизоляционных, магнитных и других электротехнических материалов можно создать электрооборудование малых габаритов и массы, надежное в эксплуатации. Но для этого необходимы знания свойств электротехнических материалов и их изменений под воздействием электрического напряжения, температуры и других факторов. Величины, с помощью которых оценивают те или иные свойства материалов, называют *характеристиками*. Чтобы полностью оценить свойства того или иного электротехнического материала, необходимо знать его механические, электрические, тепловые и физико-химические характеристики. У магнитных материалов необходимо еще знать магнитные характеристики, которые позволяют оценить их магнитные свойства.

§ 2. Механические характеристики материалов

К основным механическим характеристикам материалов относятся: разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_р$, разрушающее напряжение при сжатии $\sigma_с$, разрушающее напряжение при статическом изгибе $\sigma_и$ и ударная вязкость a.

Разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_р$ определяют на образцах материала такой формы, при которой обеспечивается



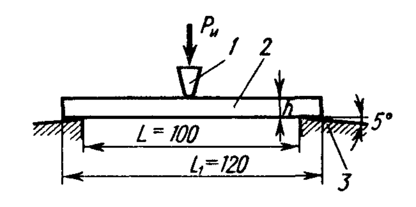


Рис. 2. Образец пластмассы (брусок), помещенный на две стальные опоры для испытания на статический и ударный изгиб

Рис. 1. Образец электрокерамического материала, помещенный в зажимы машины для испытания при растяжении

равномерное распределение растягивающего усилия по площади сечения в средней части образца. Образец 1 утолщенными концами закрепляют в стальных зажимах (захватах) 2 испытательной машины (рис. 1). Нижний зажим машины неподвижен, а к другому прикладывают разрушающее (растягивающее) усилие *P*, которое плавно нарастает с определенной скоростью до момента разрыва образца.

Разрушающее напряжение при растяжении, Н/м^2, вычисляется по формуле

$$\sigma_p = P/S_o, \qquad (1)$$

где *P* – разрушающее усилие при разрыве образца материала, Н; S_o – площадь поперечного сечения образца до испытания, м^2.

Разрушающее напряжение при сжатии σ_c определяется на образцах, имеющих форму цилиндра или куба. Так, у формованных и прессованных пластмасс эта характеристика определяется на образцах, представляющих собой сплошные цилиндры высотой 15 мм и диаметром 10 мм.

Образец располагают между стальными плитами испытательного пресса, к которым прикладывают сжимающую нагрузку. Последнюю повышают с определенной скоростью до момента разрушения образца.

Разрушающее напряжение материала при сжатии, Н/м^2, вычисляется по формуле

$$\sigma_c = P_c/S_o, \qquad (2)$$

где P_c – разрушающее усилие при сжатии образца материала, Н; S_o – площадь поперечного сечения образца материала до его испытания, м^2.

Разрушающее напряжение материала при статическом изгибе $\sigma_и$ определяется на образцах, представляющих собой бруски прямоугольного сечения. Образец *2* материала (рис. 2) помещают в испытательную машину, где он своими концами свободно опирается на две стальные опоры *3*. Изгибающее усилие $P_и$, прикладываемое к середине образца *2* через стальной наконечник *1*, плавно увеличивают и доводят до величины, при которой происходит разрушение образца. Разрушающее напряжение материала при статическом изгибе, Н/м², вычисляется по формуле

$$\sigma_и = 1{,}5 P_и L / bh^2, \qquad (3)$$

где $P_и$ – изгибающее усилие, Н; L – расстояние между стальными опорами в испытательной машине, м; b – ширина образца, м; h – толщина образца, м.

Для большинства материалов (пластмассы) применяют бруски сечением 10 × 15 мм, длиной 120 мм.

Ударная вязкость a определяется на образцах в виде брусков длиной 120 мм и сечением 15 × 10 мм (пластмассы) и сплошных цилиндров. Образец материала укладывают на две стальные опоры *3* (см. рис. 2) прибора для этих испытаний. По центру испытуемого образца наносится удар стальным наконечником *1*, падающим с высоты стального маятника. При этом происходит ударный изгиб*.

Ударную вязкость a, Дж/м², вычисляют как отношение работы ΔA, затраченной маятником на разрушение образца, к площади его первоначального сечения S_0

$$a = \Delta A / S_0. \qquad (4)$$

Чем меньше величина ударной вязкости, тем более хрупок данный материал.

§ 3. Электрические характеристики материалов*

Удельное электрическое сопротивление. Всякий электротехнический материал – проводник, полупроводник и даже диэлектрик – проводит электрический ток. Чтобы оценивать степень электропроводности того или иного материала, приходится определять удельное электрическое сопротивление материала.

Удельное электрическое сопротивление, Ом · м, вычисляется

---

* Подробней см.: Васильев Н. П. Лабораторные работы по электроматериаловедению. М., Высшая школа, 1982.

по формуле*

$$\rho = RS/l, \qquad (5)$$

где R — общее электрическое сопротивление образца материала, Ом; l — длина пути тока в образце материала, м; S — площадь образца материала, через которую протекают токи проводимости, м^2.

У металлических проводников удельные сопротивления очень малы и находятся в пределах $\rho = 10^{-8} \div 10^{-6}$ Ом · м. Это указывает на большую электрическую проводимость проводниковых материалов.

У полупроводниковых материалов (полупроводников) значения удельных сопротивлений больше, чем у проводников, и составляют $\rho = 10^{-4} \div 10^{8}$ Ом · м, а у диэлектриков они еще больше $\rho = 10^{8} \div 10^{18}$ Ом · м.

Большие значения удельного сопротивления у диэлектриков указывают на их весьма малую электрическую проводимость. У диэлектриков приходится учитывать два удельных сопротивления: удельное объемное сопротивление ρ_v и удельное поверхностное сопротивление ρ_s. Удельное объемное сопротивление позволяет оценить электрическое сопротивление диэлектрика при прохождении тока через его объем. Удельное поверхностное сопротивление позволяет оценить электрическое сопротивление при протекании тока по поверхности диэлектрика. Численно значения ρ_s всегда меньше значений ρ_v и колеблются в пределах $10^9 - 10^{16}$ Ом.

У проводниковых и полупроводниковых материалов измеряется только общее удельное сопротивление ρ, так как у этих материалов нельзя разделить токи объемной и поверхностной электрической проводимости, а следовательно, нельзя вычислить отдельно удельное объемное и удельное поверхностное сопротивление; это объясняется повышенной электрической проводимостью этих материалов.

Удельное сопротивление электротехнических материалов в значительной степени зависит от температуры (рис. 3).

Температурный коэффициент удельного сопротивления ТКρ — характеристика, позволяющая оценить изменение удельного электрического сопротивления материала с изменением его температуры. При линейном изменении удельного сопротивления (в узком интервале температур) величину ТК ρ, 1/°С, вычисляют по формуле

$$\text{ТК}\rho(\alpha) = \rho_2 - \rho_1/\rho_1\,(t_2 - t_1), \qquad (6)$$

---

* Иногда удельное объемное сопротивление выражают в Ом · см: 1 Ом · см = 0,01 Ом · м.

где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление материала при начальной температуре t_1; ρ_2 – удельное электрическое сопротивление материала при температуре t_2.

На рис. 3 можно видеть, что у проводников ТК $\rho > 0$. Это указывает на рост электрического сопротивления с повышением температуры проводников. У полупроводников и диэлектриков ТК$\rho < 0$, что указывает на уменьшение сопротивления с повышением температуры этих материалов.

Диэлектрическая проницаемость ε. Диэлектрическая проницаемость ε позволяет определить способность диэлектрика образовывать электрическую емкость. Известно, что емкость C плоского конденсатора с двумя металлическими обкладками прямо пропорциональна величине диэлектрической проницаемости ε

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/h, \tag{7}$$

где h – толщина диэлектрика, м; S – площадь одной металлической обкладки, м^2; ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8{,}85416 \cdot 10^{12}$ Ф/м); ε – диэлектрическая проницаемость (величина безразмерная).

Диэлектрическая проницаемость электроизоляционных материалов зависит от интенсивности процессов поляризации, протекающих в диэлектриках под действием приложенного напряжения. Различают четыре основных вида поляризации диэлектриков: электронную, дипольную, ионную и спонтанную.

Электронная поляризация – это упругое смещение электронных оболочек относительно ядра в атомах диэлектрика. Электронная поляризация протекает во всех диэлектриках без исключения.

Дипольная поляризация представляет собой поворот поляр-

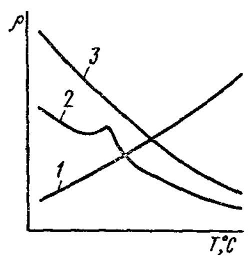


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления материалов от температуры:

1 – проводники, *2* – полупроводники, *3* – диэлектрики

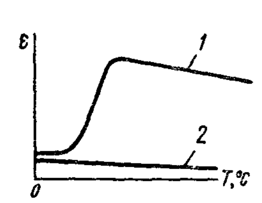


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры:

1 – полярный диэлектрик, *2* – неполярный диэлектрик

ных молекул (диполей). Этот вид поляризации наблюдается только у полярных диэлектриков, состоящих из полярных, электрически заряженных молекул. Диэлектрики же, состоящие из электрически нейтральных молекул, называют неполярными диэлектриками.

Поскольку у неполярных диэлектриков происходит единственный вид поляризации – электронная, то их диэлектрическая проницаемость невелика $\varepsilon = 1 \div 2{,}2$. У полярных диэлектриков интенсивность поляризации больше, чем у нейтральных, так как в этих диэлектриках имеет место два вида поляризации: дипольная и электронная. Поэтому диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков больше, чем у нейтральных, и находится в пределах 3–8 и более.

У ионных кристаллических диэлектриков (слюда, электрокерамика) наряду с электронной поляризацией имеет место **ионная поляризация,** представляющая собой упругое смещение ионов с мест своего закрепления. Следовательно, интенсивность процесса поляризации у ионных диэлектриков достаточно большая, поэтому диэлектрическая проницаемость у них составляет 8–20 и более.

Спонтанная поляризация протекает у особого вида диэлектриков, называемых сегнетоэлектриками. Типичным представителем этой группы диэлектриков является сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$.

Внутри сегнетоэлектриков имеются области (домены) со слабо связанными диполями. При приложении напряжения в сегнетоэлектрике начинает интенсивно развиваться процесс спонтанной поляризации. Он представляет собой поворот диполей под действием сил электрического поля внутри сегнетоэлектрика. Наряду с этим в сегнетоэлектрике протекают процессы ионной и электронной поляризации. Поэтому у сегнетоэлектриков диэлектрическая проницаемость достигает значений 1 500–4 500 и более.

Диэлектрическая проницаемость электроизоляционных материалов изменяется в зависимости от температуры (рис. 4), частоты приложенного напряжения и других факторов.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Если отрезок металлического проводника один раз включить под постоянное напряжение, а другой – под переменное, действующее значение которого будет равно постоянному напряжению, то потери энергии в том и другом случае будут одинаковы, т. е. $P_{\sim} = P_{-}$.

Если же такой опыт произвести с диэлектриком, то потери энергии в нем на переменном напряжении будут во много раз больше потерь энергии на постоянном напряжении, т. е.

$P_\sim \gg P_-$. Потери энергии в диэлектрике называют *диэлектрическими потерями* (активная мощность).

Активную мощность, Вт, теряемую в диэлектрике, работающем под постоянным напряжением U, подсчитывают по формуле

$$P = UI,$$

где I – ток проводимости через диэлектрик, А; U – напряжение, приложенное к диэлектрику, В.

Активную мощность, Вт, теряемую в диэлектрике, работающем под переменным напряжением, подсчитывают по формуле

$$P_a = U^2 2\pi f C \operatorname{tg}\delta, \qquad (8)$$

где U – переменное напряжение, приложенное к диэлектрику, В; f – частота, Гц; C – емкость диэлектрика (изоляции), Ф.

Из выражения (8) следует, что при заданном напряжении U, частоте f и емкости диэлектрика C активные потери в нем будут зависеть от величины $\operatorname{tg}\delta$. У газообразных диэлектриков $\operatorname{tg}\delta = 10^{-6} \div 10^{-5}$, поэтому газообразные диэлектрики (воздух и др.) используются в образцовых конденсаторах.

У жидких и твердых диэлектриков высшего класса $\operatorname{tg}\delta = (2 \div 6) \cdot 10^{-4}$, у остальных $\operatorname{tg}\delta = 0{,}002 \div 0{,}05$.

Таким образом, $\operatorname{tg}\delta$ определяет потери энергии в диэлектриках. Эта величина в сильной степени зависит от температуры диэлектрика (рис. 5).

Увеличение $\operatorname{tg}\delta$ у неполярного диэлектрика, а следовательно, и потерь энергии в нем обусловлено возрастанием тока проводимости в диэлектрике. У полярного диэлектрика рост $\operatorname{tg}\delta$ до температуры t_1 обусловлен потерями энергии, затрачиваемой на поворот все большего количества полярных молекул. В интервале температур $t_1 - t_2$ потери энергии падают. Это вызвано тем, что сильный нагрев диэлектрика лишает диполи возможности принять участие в процессе поляризации, так как происходит тепловой разброс диполей. Рост $\operatorname{tg}\delta$, а следовательно, активных потерь в диэлектрике, начиная с температуры t_2 и выше, вызван увеличением тока проводимости, так как с нагревом диэлектрика выше температуры t_2 вязкость его уменьшается и носители тока (свободные ионы и электроны) приобретают большую скорость, в связи с чем ток проводимости возрастает.

Электрическая прочность $E_{пр}$ представляет собой напряженность электрического поля, при которой происходит пробой – разрушение диэлектрика с образованием в нем сквозного

канала с очень большой проводимостью. Электрическую прочность диэлектрика, В/м, при пробое его в однородном* поле вычисляют по формуле

$$E_{пр} = U_{пр}/h, \qquad (9)$$

где $U_{пр}$ — пробивное напряжение, при котором наступает пробой диэлектрика, В; h — толщина диэлектрика в месте пробоя, м.

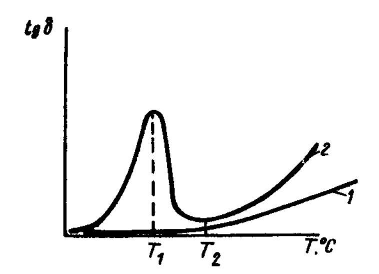


Рис. 5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры диэлектрика:

1 — неполярный диэлектрик, 2 — полярный диэлектрик

Рис. 6. Зависимость электрической прочности от температуры диэлектрика (при тепловом пробое)

Ввиду того что диэлектрики пробиваются при очень больших напряжениях (тысячи вольт), значения электрической прочности исчисляют в мегавольтах на метр толщины материала в месте пробоя (МВ/м).

Как правило, $E_{пр}$ уменьшается с увеличением толщины диэлектрика и с повышением температуры (рис. 6).

§ 4. Тепловые характеристики материалов

Тепловые характеристики позволяют оценить поведение электроизоляционных материалов при нагревании. Это имеет важное значение, так как большинство электроизоляционных материалов в электрических машинах и аппаратах работает при повышенных температурах. Основными тепловыми характеристиками являются следующие.

Температура плавления определяется у материалов кристаллической структуры (металлы, полупроводники, диэлектрики), которые могут переходить из твердого состояния в жидкое при определенной температуре.

* Однородным называется такое электрическое поле, во всех точках которого напряженности E одинаковы.

Температура размягчения определяется у материалов аморфной структуры (смолы, битумы и др.). У этих материалов переход из твердого в жидкое состояние происходит не при строго определенной температуре, а в некотором интервале температур. Поэтому у аморфных материалов измеряют некоторую условную температуру размягчения, при которой материал приобретает вязкотекучее состояние. При температурах, близких к температуре размягчения, материал применять нельзя, так как он будет размягчаться и течь.

Теплостойкость – характеристика, позволяющая оценить стойкость диэлектриков к кратковременному нагреву. Теплостойкость определяют с помощью аппарата Мартенса (рис. 7) на образцах, представляющих собой бруски сечением 10×15 мм и длиной 120 мм. Бруски *7* устанавливают в аппарате в вертикальном положении в стальные гнезда *9*, приваренные к стальной плите *10*. Плита помещается на дне аппарата *8*, обогреваемого электронагревательными проволочными спиралями. На верхний конец каждого бруска надевают стальной зажим *6*, снабженный штоком *5* с грузом *11*. На свободный конец штока опирается тонкий стальной стержень *1* с указателем *2*. Груз *11* устанавливают на штоке *5* с таким расчетом, чтобы в опасном сечении бруска под действием изгибающего момента создавалось напряжение 50×10^5 Н/м^2.

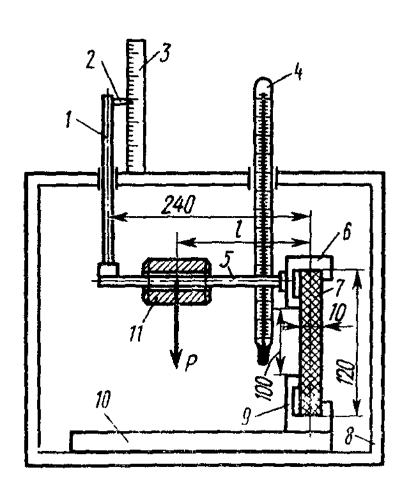


Рис. 7. Аппарат Мартенса для определения теплостойкости пластмасс

В аппарат Мартенса одновременно помещают три образца данного материала, между которыми устанавливают два термометра *4*. С помощью терморегулятора подъем температуры внутри термостата производят со скоростью 50 °С в час. При одновременном воздействии на образцы нагрева и изгибающего момента они начинают деформироваться – изгибаться. При этом свободный конец штока *5* и стержень *1* опускаются. Глубина опускания конца штока фиксируется указателем *2* на миллиметровой шкале *3*.

За теплостойкость, определенную по этому методу, прини-

мают температуру, при которой деформация образца достигает такого предела, когда указатель *2* опускается по шкале на 6 мм. При этом вычисляется средняя арифметическая величина температуры на основании одновременного испытания трех образцов данного материала, т. е. по показаниям двух термометров. Так, например, теплостойкость (по Мартенсу) для полистирола 75–80 °С, гетинакса 150–170 °С.

Нагревостойкость – это способность электроизоляционного материала длительно выдерживать предельно допустимую температуру без признаков разрушения. Для электроизоляционных материалов, применяемых в электрических машинах и аппаратах, установлено семь классов нагревостойкости (табл. 1).

Таблица 1. **Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов**

Класс нагревостойкости	Предельно допустимая температура, °С	Класс нагревостойкости	Предельно допустимая температура, °С
Y	90	F	155
A	105	H	180
E	120	C	Выше 180
B	130		

К классу Y относятся органические диэлектрики: полистирол, полиэтилен; волокнистые непропитанные материалы: картоны, бумаги, хлопчатобумажные ткани, натуральный шелк и др.

К классу А относятся пропитанные (лаками и другими составами) хлопчатобумажные и шелковые ткани (лакоткани), а также многие пластмассы – гетинакс, текстолит и др.

К классу В относятся такие материалы, как лавсановые электроизоляционные пленки, стеклотекстолит на бакелитовой смоле и др.

К классу Е относятся все клееные слюдяные материалы (миканиты) и материалы на основе стекловолокна, в которых применены клеящие составы класса нагревостойкости А или Е (бакелитовые смолы, лаки на основе этих и других смол).

К классу F относятся материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, склеенные или пропитанные лаками повышенной нагревостойкости (эпоксидными и др.).

К классу Н относятся кремнийорганические лаки, а также композиционные материалы, состоящие из слюды, стеклянных

волокон, склеенных при помощи кремнийорганических смол и лаков.

К классу С относятся преимущественно диэлектрики неорганического происхождения (электрокерамика, стекла, слюда без клеящих или пропиточных составов органического происхождения и др.). Из органических высокополимерных диэлектриков в этот класс входит фторопласт-4 и полиимиды.

Холодостойкость позволяет оценить способность материала противостоять действию низких температур. Известно, что при низких температурах электроизоляционные материалы (резины, пластмассы, лаковые пленки и др.) растрескиваются или теряют гибкость.

У жидких диэлектриков холодостойкость определяют температурой застывания, при которой они превращаются в твердое тело.

Температура вспышки паров жидких диэлектриков (масел) – это температура, при которой пары и газы, образующиеся при нагревании определенного объема жидкого диэлектрика, вспыхивают при соприкосновении их с открытым пламенем.

§ 5. Физико-химические характеристики материалов

Кислотное число – это количество миллиграммов (мг) едкого калия (КОН), которое необходимо для нейтрализации свободных кислот, содержащихся в 1 г жидкого диэлектрика.

Чем выше кислотное число, тем больше свободных кислот в жидком диэлектрике, а значит, тем выше его проводимость, так как кислоты под действием электрического напряжения легко распадаются на ионы. Кроме того, кислоты могут разрушать электроизоляционные волокнистые материалы (бумагу, хлопчатобумажную обмотку и др.), с которыми соприкасается жидкий диэлектрик.

Вязкость представляет собой коэффициент внутреннего трения при относительном перемещении частиц жидкости. Если вязкость велика, жидкость густая и ее частицы имеют малую подвижность, если же вязкость мала, то частицы жидкости подвижны, т. е. жидкость обладает хорошей текучестью.

Вязкость определяет пропитывающую способность жидких диэлектриков. Чем меньше вязкость пропиточных электроизоляционных составов (лаков, компаундов), тем глубже проникают их частицы в поры волокнистой изоляции обмоток. С возрастанием вязкости пропитывающая способность жидких диэлектриков уменьшается. Для оценки коэффициента внутреннего трения жидкости определяют кинематическую ($м^2/с$) и условную (с) вязкость.

У всех жидкостей с ростом температуры вязкость уменьшается. Это объясняется уменьшением сил взаимосвязи между частицами жидкости.

Водопоглощение – характеристика, позволяющая оценить способность диэлектрика противостоять воздействию воды, которая, проникая в поры материала, вызывает снижение его электрических характеристик. Для оценки водопоглощения образцы твердых диэлектриков вначале взвешивают, а затем погружают в сосуд с водой при комнатной температуре. По истечении 24 ч* образцы вынимают из воды и снова взвешивают.

Водопоглощение W материала, %, вычисляют по формуле

$$W = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100, \tag{10}$$

где G_1 – масса образца материала в высушенном состоянии, г; G_2 – масса образца материала после выдержки его в воде в течение 24 ч, г.

Тропическая стойкость (тропикостойкость) определяется у электроизоляционных материалов, предназначенных для электрооборудования, работающего в условиях тропического климата.

Здесь не защищенные герметически закрытыми оболочками электроизоляционные материалы подвергаются следующим воздействиям: высокой температуре окружающего воздуха (45–55 °С); резкому изменению температуры в течение суток (на 40 °С и более); высокой влажности воздуха (90–95 %); солнечной радиации (большая плотность светового и теплового потоков); плесневых грибков (микроорганизмов), повреждающих многие электроизоляционные материалы органического происхождения; насекомых и грызунов, повреждающих изоляцию в электрооборудовании открытого типа; воздуха, содержащего соли и пыль.

Перечисленные факторы оказывают разрушающее действие на такие органические материалы, как хлопчатобумажные и шелковые ткани, а также многие пластмассы с древесными наполнителями. Эти материалы могут применяться только в том случае, если они используются в герметически закрытых кожухах или защищены толстым слоем тропикостойких компаундов типа эпоксидных и др.

---

* У материалов с малым водопоглощением эту величину определяют после пребывания образцов в воде: в течение 48 и 72 ч.

Наиболее стойкими к тропическим воздействиям являются материалы неорганического происхождения – электрокерамика, бесщелочное стекло и др. Высокой стойкостью к тропическим воздействиям обладают многие синтетические диэлектрики органического происхождения (бакелитовые, эпоксидные, поливинилхлоридные кремнийорганические смолы. фторопласты и пластмассы на их основе с неорганическими наполнителями – стеклянное и асбестовое волокно, кварцевая мука, а также лаки, эмали и компаунды на основе этих смол).

Тропическую стойкость электроизоляционного материала или изделия определяют специальными испытаниями.

Контрольные вопросы

1. Перечислите механические характеристики (параметры) материалов и назовите единицы их измерения.
2. Перечислите электрические характеристики (параметры) материалов и назовите единицы их измерения.
3. Как изменяется удельное электрическое сопротивление диэлектриков, полупроводников и проводников в зависимости от их температуры?
4. Перечислите тепловые характеристики материалов.
5. Перечислите основные физико-химические характеристики материалов.

ГЛАВА II. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 6. Газообразные диэлектрики

К газообразным диэлектрикам относятся все газы и воздух, представляющий собой смесь газов и паров воды. Многие газы используют в качестве диэлектриков в газонаполненных конденсаторах, воздушных выключателях высокого напряжения и в других электротехнических устройствах. Воздух окружает все электрические установки и как диэлектрик во многом определяет надежность их работы. Провода линий электропередачи высокого напряжения, закрепленные на мачтах с помощью фарфоровых или стеклянных изоляторов, на всем протяжении изолированы друг от друга только слоем воздуха. Иногда в слое воздуха, непосредственно соприкасающемся с поверхностью проводов высокого напряжения, наблюдается светлое фиолетовое свечение – электрическая корона (рис. 8), которое сопровождается характерным шипением. Электрическая корона возникает при ухудшении электроизоляционных свойств воздуха или при воздействии на воздух повышенного напряжения. Она вызывает потери энергии, поэтому с этим явлением следует бороться.

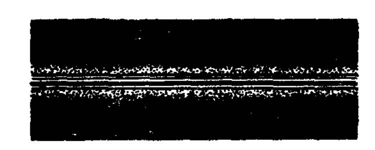


Рис. 8. Электрическая корона в воздухе около голого провода

В особенно невыгодных условиях работы оказываются газовые включения (пузырьки воздуха) внутри твердой изоляции Напряженности (E) электрического поля в последовательно соединенных слоях изоляции распределяются обратно пропорционально их диэлектрическим проницаемостям, т. е.

$$E_1/E_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_1. \qquad (11)$$

У многих газов диэлектрическая проницаемость (ε_1) немногим больше единицы (табл. 2), а у твердых диэлектриков

Таблица 2. **Основные характеристики газообразных диэлектриков**

Диэлектрик	Плотность, г/см³	Диэлектрическая проницаемость	Электрическая прочность МВ/м	Коэффициент теплопроводности*	Теплоемкость*
Воздух	1	1,00057	3	1	1
Азот	0,97	1,00058	3	1.08	1,05
Водород	0,69	1,00026	1,8	6.69	14,35
Углекислый газ	1,529	1,00098	2,7	0,64	0,85
Элегаз**	5,03	1,00191	7,2	1.25	0,6

* Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости газов выражены в условных единицах. У воздуха эти параметры приняты за единицу

** Элегаз – электрический искусственный газ (SF_6) – применяется в электрических аппаратах.

(ε_2) она находится в пределах от 2 до 8 и более. Вследствие этого газовые включения внутри твердой изоляции будут находиться под воздействием напряженностей, в 2–8 раз превосходящих напряженности в твердой изоляции. Это может вызвать ионизацию газовых включений, т. е. образование в них большого количества электрически заряженных частиц (электронов и ионов).* Это часто влечет за собой пробой изоляции, что может вызвать выход из строя электрической машины, аппарата, кабеля и т. д. В нормальных условиях работы газообразные диэлектрики имеют очень малую проводимость и незначительные диэлектрические потери ($\text{tg}\delta \approx 10^{-6}$).

* Местные пробои газовых включений внутри твердого или жидкого диэлектрика называют *частичными разрядами*.

§ 7. Электрическая проводимость газообразных диэлектриков

Во всех газах еще до воздействия на них электрического напряжения всегда имеется некоторое количество электрически заряженных частиц – электронов и ионов, которые находятся в беспорядочном тепловом движении. Это могут быть заряженные частицы газа, а также заряженные частицы твердых и жидких веществ – примесей, находящихся, например, в воздухе.

Образование электрически заряженных частиц в воздухе вызывается ионизацией газа внешними источниками энергии (внешними ионизаторами): космическими и солнечными лучами, радиоактивными излучениями Земли и др.

Процесс ионизации газа внешними ионизаторами заключается в том, что они сообщают часть энергии атомам газа. При этом валентные электроны приобретают дополнительную энергию и отделяются от своих атомов, которые превращаются в положительно заряженные частицы – положительные ионы. Образовавшиеся свободные электроны могут или длительно сохранять самостоятельность движения в газе, или через некоторое время они присоединяются к электрически нейтральным атомам и молекулам газа, превращая их в отрицательно заряженные ионы.

Находясь в беспорядочном тепловом движении, некоторая часть противоположно заряженных частиц (электронов) и положительно заряженных (ионов) воссоединяется друг с другом и образует электрически нейтральные атомы и молекулы газа. Этот процесс называется *восстановлением, или рекомбинацией.*

Если между металлическими электродами заключить какой-либо объем газа, то при приложении к электродам электрического напряжения на заряженные частицы в газе будут действовать электрические силы – напряженности электрического поля.

Под действием этих сил электроны и ионы будут перемещаться от одного электрода к другому, создавая электрический ток в газе.

Ток в газе будет тем больше, чем больше заряженных частиц образуется в нем в единицу времени и чем бóльшую скорость приобретают они под действием сил электрического поля. Ясно, что с повышением напряжения, приложенного к данному объему газа, электрические силы, действующие на электроны и ионы, увеличиваются. При этом скорость заряженных частиц, а следовательно, и ток в газе возрастают.

Изменение тока в зависимости от напряжения, приложенного к объему газа, выражается графически в виде кривой,

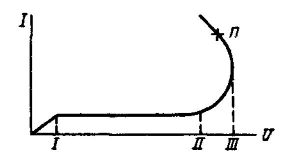


Рис. 9. Вольтамперная характеристика для газообразного диэлектрика

называемой *вольтамперной характеристикой* (рис. 9). Последняя показывает, что в области слабых электрических полей, когда электрические силы, действующие на заряженные частицы, относительно невелики (область *I* на графике), ток в газе возрастает пропорционально приложенному напряжению. В этой области изменение тока происходит согласно закону Ома.

С дальнейшим ростом напряжения (область *II*) пропорциональность между током и напряжением нарушается. В этой области ток проводимости не зависит от напряжения. Здесь происходит накопление энергии заряженными частицами газа – электронами и ионами. С дальнейшим же повышением напряжения (область *III*) скорость заряженных частиц резко возрастает, вследствие чего происходят частые соударения их с нейтральными частицами газа. При этих упругих соударениях электроны и ионы передают часть накопленной ими энергии нейтральным частицам газа. В результате электроны отделяются от своих атомов. При этом образуются новые электрически заряженные частицы: свободные электроны и ионы.

Ввиду того что летящие заряженные частицы соударяются с атомами и молекулами газа часто, образование новых электрически заряженных частиц происходит весьма интенсивно. Этот процесс называется *ударной ионизацией газа*. В области ударной ионизации (область *III* на рис. 9) ток в газе интенсивно возрастает при малейшем повышении напряжения. Процесс ударной ионизации в газообразных диэлектриках сопровождается резким уменьшением величины удельного объемного сопротивления (ρ_v) газа и возрастанием тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$).

Естественно, что газообразные диэлектрики могут использоваться при напряжениях, меньших тех значений, при которых возникает процесс ударной ионизации. В этом случае газы являются хорошими диэлектриками, у которых удельное объемное сопротивление очень велико ($\rho \approx 10^{18}$ Ом · м), а тангенс угла диэлектрических потерь очень мал ($\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-6}$).

§ 8. Пробой газообразных диэлектриков

Развитие процесса ударной ионизации в газе приводит к пробою данного объема газа (точка *П* на рис. 9). В момент

пробоя газа ток в нем резко возрастает, а напряжение стремится к нулю. Пробой газа происходит в виде искрового разряда, т. е. светящихся искр, соединяющих поверхности металлических электродов, помещенных в газовой среде.

Явление пробоя газообразных диэлектриков в однородном* электрическом поле выражается формулой (закон Пашена)

$$U_{пр} = Aph, \tag{12}$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение слоя газа; p – давление газа; h – расстояние между электродами в газе; A – величина, зависящая от давления газа (p) и толщины слоя газа (h).

Согласно закону Пашена величина пробивного напряжения любого газа пропорциональна давлению газа и расстоянию между электродами (рис. 10). Таким образом, величина пробивного напряжения газа увеличивается с ростом давления газа и с увеличением толщины слоя газа между электродами (правая часть кривой на рис. 10). С уменьшением же давления и расстояния между электродами пробивное напряжение газа уменьшается, но, пройдя минимум**, начинает снова возрастать в области разреженного газа или в области малых расстояний между электродами (левая часть U-образной кривой на рис. 10). Это понятно, так как в области разреженного газа резко уменьшается количество атомов и молекул газа, являющихся объектами ионизации, а значит, и процесс ударной ионизации происходит при более высоких напряжениях.

В области очень малых расстояний между электродами (h = 0,1 мм и менее) пробой газа также происходит при повышенных значениях пробивного напряжения. Это объясняется сокращением длины пути, на котором заряженные частицы не могут накапливать энергию, необходимую для осуществления процесса ударной ионизации. Чтобы такой процесс происходил, необходимы более высокие напряжения. Значит, слой газа меньшей толщины обладает более высокой электрической прочностью, чем слои газа большей толщины. Таким образом, с увеличением толщины слоя газа его электрическая прочность уменьшается. При нормальном давлении и расстоянии между электродами 1 см и более электрическая прочность воздуха $E_{пр} \approx 3$ МВ/м. С увеличением толщины слоя воздуха она медленно убывает. То же наблюдается и у других газов. Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что наиболь-

---

* Однородным электрическим полем называется такое поле, во всех точках которого силы электрического поля (напряженности E) равны между собой, а плотность силовых линий всюду одинакова.

** Для воздуха этот минимум $U_{пр}$ = 280 В.

шей электрической прочностью обладает элегаз, а наибольшими теплопроводностью и теплоемкостью – водород. Поэтому водород широко используется в качестве охлаждающей среды (вместо воздуха) в электрических машинах большой мощности (генераторы).

Пробой газообразного диэлектрика протекает по-разному в зависимости от степени однородности электрического поля в газе. Так, пробой в воздухе при наличии в нем однородного электрического поля происходит сразу в виде искры. Этот искровой разряд может переходить в электрическую дугу при достаточной мощности источника тока.

Пробой же газа в неоднородном электрическом поле проходит через ряд промежуточных стадий. Вначале наступает неполное электрическое разрушение слоя газа у электрода с меньшим радиусом, так как у его поверхности наблюдаются наибольшие напряженности электрического поля. Затем при повышении напряжения у поверхности электрода с малым радиусом (острие, провод малого диаметра и др.) в газе возникает коронирующий разряд – видимая электрическая корона (см. рис. 8) Она представляет собой светло-фиолетовое свечение в слое воздуха около электрода с меньшим радиусом. Электрическая корона сопровождается шипением и образованием в воздухе озона O_3 и оксида азота NO. Эти газы являются активными окислителями металлов и многих электроизоляционных материалов органического происхождения (резины, пластмассы и др.).

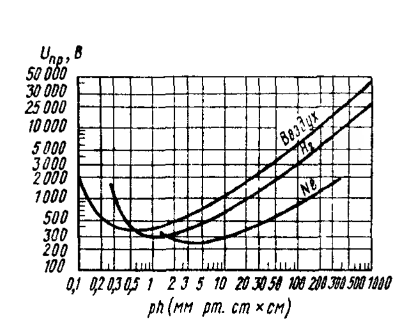


Рис. 10. Зависимость пробивного напряжения газов от произведения давления газа p на расстояние h между электродами

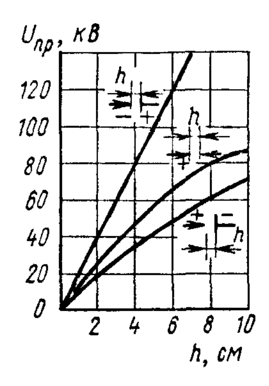


Рис. 11. Зависимость пробивного напряжения воздуха между электродами: острие – плоскость и острие – острие при различной поляриости острия

Под действием озона и оксидов азота большинство органических диэлектриков разрушается. С дальнейшим повышением напряжения коронирующий разряд переходит в искровой, т. е. происходит полное электрическое разрушение газа.

Следует заметить, что пробой газа в однородном электрическом поле, как правило, происходит при большем напряжении по сравнению с пробоем того же слоя газа в неоднородном электрическом поле.

На практике приходится встречаться главным образом с неоднородными электрическими полями. Они наблюдаются между двумя соседними проводами высокого напряжения, между проводом и заземленной мачтой на линиях электропередачи и в других случаях.

Типичными электродами, между которыми образуются неоднородные электрические поля, являются: острие – плоскость; острие – острие и некоторые другие. Действительно, около острия густота силовых линий очень велика, следовательно, здесь действуют напряженности большой величины, могущие вызвать ударную ионизацию газа. По мере удаления от острия к плоскости густота силовых линий уменьшается, следовательно, напряженности электрического поля тоже уменьшаются. При этом их ионизирующее действие на частицы газа снижается.

Закономерности в отношении пробоя газа между типичными электродами наблюдаются у многих элементов установок высокого напряжения (линии электропередачи, воздушные выключатели и др.). Большое влияние на пробой газа в неоднородном поле оказывает полярность электродов. Для слоя газа одной и той же толщины при положительном острие (игле) и отрицательно заряженной плоскости пробивное напряжение значительно меньше, чем при отрицательном острие (рис. 11). Это объясняется накоплением положительно заряженных ионов около острия и распространением их в направлении отрицательно заряженной плоскости. Вследствие этого острие как бы прорастает в толщу газа, сокращая путь искровому разряду При этом пробой газа происходит при сравнительно низких напряжениях.

При отрицательно заряженном острие пробивные напряжения в этом случае выше, чем при положительном острие. Пробивные напряжения воздуха между двумя остриями лежат выше, чем в случае острие – плоскость (при положительном острие). Это объясняется несколько меньшей неоднородностью электрического поля между двумя остриями. Чтобы избежать возникновения электрической короны и повысить величину пробивного напряжения газообразного диэлектрика, острые

кромки электродов стараются закруглить или закрыть их металлическими колпаками (экранами) бо́льшего диаметра.

Ранее рассматривались явления пробоя газа при отсутствии в нем твердых диэлектриков. На практике часто встречаются случаи пробоя газа на границе с твердым диэлектриком. Примером этого является поверхностное искровое перекрытие фарфорового изолятора. Оно представляет собой пробой слоя воздуха у поверхности твердого диэлектрика. Во всех случаях пробоя воздуха на границе с твердым диэлектриком пробивное напряжение меньше по сравнению с пробивным напряжением для того же расстояния в газе при отсутствии твердого диэлектрика.

§ 9. Общее понятие о жидких диэлектриках

Жидкие диэлектрики широко применяют в электротехнических установках. Ими заполняют внутреннее пространство силовых трансформаторов, реакторов, масляных выключателей, конденсаторов, кабелей и других элементов электрооборудования. Жидкие диэлектрики, заливаемые в электрооборудование под вакуумом, хорошо пропитывают пористую изоляцию обмоток, картоны и другие пористые электроизоляционные материалы и намного повышают их электрическую прочность. Наряду с этим жидкие диэлектрики выполняют роль теплоотводящей среды. Так, изоляционное масло в трансформаторах нагревается у обмоток, а затем, перемещаясь к холодным стенкам бака трансформатора, отдает им полученное тепло. В масляных выключателях жидкий диэлектрик не только изолирует токопроводящие части, но и выполняет роль среды, гасящей электрическую дугу, которая возникает между контактами срабатывающего выключателя.

В качестве жидких диэлектриков наибольшее применение получили нефтяные электроизоляционные масла. Они делятся на три группы: для трансформаторов и высоковольтных выключателей; для пропитки бумажной изоляции конденсаторов; для высоковольтных кабелей. Меньшее применение нашли синтетические масла: совол, совтолы и ПЭСЖ («Калория-2»).

§ 10. Нефтяные масла

Нефтяные электроизоляционные масла получают методом дробной перегонки нефти. Это сложный процесс, состоящий из ряда операций, в результате которых получают соляровое масло. Последовательной обработкой солярового масла серной кислотой и щелочью из него удаляют химически нестойкие

соединения. После очистки, сушки и фильтрации получают электроизоляционное масло для трансформаторов, конденсаторов и кабелей. Конденсаторные и кабельные масла отличаются более глубокой очисткой от примесей и поэтому обладают более высоким уровнем электрических характеристик.

Химический состав нефтяных масел определяется составом нефти. Все нефтяные электроизоляционные масла – это смесь углеводородов нафтенового, парафинового и ароматического ряда.

Нафтеновые углеводороды представляют собой соединения углерода с водородом в виде замкнутых колец с боковыми цепями, поэтому их часто называют циклическими углеводородами.

$$\begin{array}{ccc} & CH-CH_2-CH_3 & \\ & / \quad \backslash & \\ H_2C & & CH_2 \\ | & & | \\ H_2C & & CH_2 \\ & \backslash \quad / & \\ & CH_2 & \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} & CH-CH_3 & \\ & / \quad \backslash & \\ H_2C & & CH_2 \\ | & & | \\ H_2C & - & CH-CH_3 \end{array}$$

Эти углеводороды стойки к окислению, поэтому их используют в составе масел. Содержание их в масле достигает 70 – 80 %.

Углеводороды парафинового ряда представляют собой соединения углерода и водорода в виде молекул цепочечной структуры.

$$\begin{array}{ccccccccc} & & H & & H & & H & & H \\ & & | & & | & & | & & | \\ H & - & C & - & C & - & C & \ldots - & C & - H \\ & & | & & | & & | & & | \\ & & H & & H & & H & & H \end{array}$$

Как видно из этой формулы, цепочки могут быть различной длины в зависимости от количества соединенных между собой атомов углерода. Углеводороды парафинового ряда обладают химической стабильностью, т. е. стойкостью против окисления.

Ароматические углеводороды тоже являются циклическими соединениями углерода с водородом, стойкими к окислению. Установлено, что удаление этих углеводородов из электроизоляционного масла приводит к его быстрому окислению, однако чрезмерное количество ароматических углеводородов в составе масел понижает температуру вспышки паров масла и вызывает выпадение осадков. В результате этого ухудшаются электрические характеристики масла. Количество ароматических углеводородов в масле не превышает 10 – 12 %.

В состав электроизоляционных нефтяных масел входят и другие компоненты – органические кислоты, смолистые вещества, сернистые соединения и небольшое количество непредельных углеводородов, нестойких к окислению.

Большое количество электроизоляционных нефтяных масел используют также в производстве силовых кабелей с бумажной изоляцией.

Кабельные масла делятся по вязкости: масла малой вязкости МН-2; масла средней вязкости С-110 и С-220; масла вязкие.

Маловязкое масло МН-2 применяется в маслонаполненных кабелях низкого и среднего давления (до $3 \cdot 10^5$ Па). Малая вязкость масла для таких кабелей необходима, чтобы обеспечить подпитку кабеля маслом через сравнительно небольшие каналы при всех эксплуатационных температурах.

Средневязкие масла С-110 и С-220 предназначаются для пропитки и заполнения маслонаполненных высоковольтных кабелей на напряжение 110 кВ и выше при давлении около $14 \cdot 10^5$ Па. Эти масла не содержат в своем составе ни ароматических углеводородов, ни смолистых веществ. Они представляют собой технически чистую смесь нафтеновых и парафиновых углеводородов, поэтому обладают весьма устойчивыми электрическими характеристиками.

Наиболее вязкое масло применяется для кабелей с бумажной изоляцией до 35 кВ, у которых пропитывающим жидким веществом является нефтяное масло с растворенной в нем канифолью. В этих кабелях жидкая изоляция не находится под каким-либо избыточным давлением и высокая вязкость пропитывающего масла позволяет избежать перетекания его в кабеле при наклонных или вертикальных прокладках.

В табл. 3 приведены основные характеристики электроизоляционных нефтяных масел.

Все масла в процессе их эксплуатации находятся под воздействием повышенных температур, электрического поля, а также соприкасаются с металлическими частями электрооборудования. В некоторых видах электрооборудования масло соприкасается с атмосферным воздухом. Все перечисленные факторы вызывают старение масла, в основе которого находится его окисление. Старение масла ускоряется металлическими катализаторами: медью, латунью, железом и другими металлами. Присутствие воды в масле тоже ускоряет процесс его старения. При старении в масле образуются твердые смолообразные примеси, не растворимые и растворимые в горячем масле. Такие примеси выпадают в виде осадков на обмотках и других частях трансформатора, что затрудняет теплоотвод от нагретых частей. Будучи же растворенными в масле, примеси значи-

Таблица 3. **Основные характеристики нефтяных изоляционных масел**

Характеристики	Единицы измерения	Трансформаторное масло	Конденсаторное масло	Кабельные масла	
				МН-2	С-220
Плотность	кг/м^3	885–890	860	890	840
Вязкость:					
при 20 °С	м^2/с	$30 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$	$800 \cdot 10^{-6}$
при 50 °С	м^2/с	$8 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$
Температура вспышки паров (не менее)	°С	135	135	135	180
Температура застывания (не выше)	С	–45	–45	–45	–30
Удельное объемное сопротивление при 20 °С	Ом · м	10^{12} – 10^{13}	10^{13} – 10^{14}	10^{12} – 10^{13}	10^{13}
Кислотное число	мг КОН/г	0,03–0,05	0,01–0,02	0,04	0,02
Диэлектрическая проницаемость	–	2,2–2,4	2,2	2,3	2,1
Тангенс угла диэлектрических потерь при 50 Гц	–	0,003–0,005	0,002–0,003	0,003	0,003
Электрическая прочность при 20 °С	МВ/м	18	20	18	20

тельно ухудшают его электрические свойства. В процессе старения масла в нем образуются кислоты и влага, которые резко снижают уровень изоляции в трансформаторах, кабелях и в других видах электрооборудования.

Чтобы замедлить старение масел, в них вводят вещества, задерживающие окисление, – ингибиторы. Однако присадка ингибиторов не может полностью предохранить масло от старения. Поэтому электроизоляционные масла следует хранить и перевозить в сухой таре, перекачивать их по чистым металлическим трубопроводам (но не по резиновым шлангам, которые, растворяясь, загрязняют масло). В условиях эксплуатации масло необходимо защищать от проникновения в него воздуха и влаги. Крышки маслонаполненных аппаратов должны плотно закрываться и иметь консерваторы, т. е. дополнительные бачки. Иногда в трансформаторах пространство над уровнем масла заполняют инертным газом, например азотом, который защищает масло от окисления.

Несмотря на меры предохранения масла от старения оно все же окисляется, и со временем в нем появляются твердые и жидкие продукты окисления и вода. Поэтому находящееся в эксплуатации масло необходимо время от времени очищать

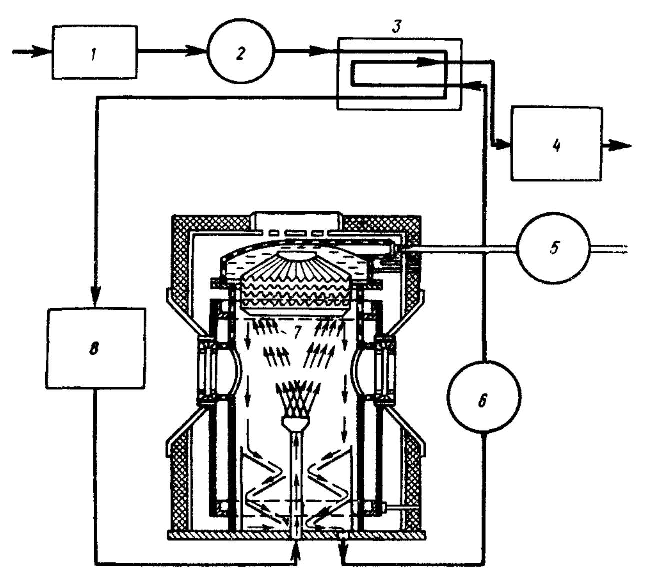


Рис. 12. Схема сушки масла распылением под вакуумом:

1 – предварительный фильтр, *2*, *5*, *6* – насосы, *3* – теплообменник, *4* – фильтр-пресс, *7* – вакуумный котел, *8* – электроподогреватель

от примесей и воды и даже восстанавливать его свойства. Существует несколько способов очистки. Воду из масла можно удалить путем испарения, нагревая масло до температуры кипения воды. Однако всякое нагревание масла при наличии доступа воздуха портит его, поэтому сушку масла производят в специальных установках под вакуумом. Этим, во-первых, устраняется в значительной степени воздух и, следовательно, кислород и, во-вторых, понижается температура кипения воды, т е. облегчается ее испарение.

На рис. 12 показана схема сушки масла при его распылении в вакууме. Масло насосом *2* через фильтр *1*, теплообменник *3* и электроподогреватель *8* подается в распыленном состоянии в вакуумный котел *7*, откуда откачиваются пары воды и газа (вакуумным насосом *5*). Далее масло подается насосом *6* через теплообменник *3* и фильтр-пресс *4*, а затем поступает непосредственно в трансформатор или в тару. В этом случае масло освобождается от воды и примесей.

От твердых примесей масло можно очистить при помощи центрифуги, где твердые частицы, имеющие бóльшую плотность, чем масло, отбрасываются к стенкам центрифуги и удаляются. Масло здесь подвергается разделению на тонкие пленки, поэтому имеется опасность его окислить, так как для лучшей очистки и понижения вязкости масло через центрифугу пропускают в нагретом состоянии (до 40 – 60 °С).

От воды и твердых частичек загрязнений жидкие диэлектрики очищают также с помощью фильтр-пресса, через который подогретую изоляционную жидкость прокачивают под давлением $(3 \div 5) \cdot 10^5$ Па. Она проходит систему перегородок из фильтровального картона. Твердые частицы загрязнений оседают на поверхности листов картона, а стенки их капилляров поглощают влагу, но пропускают очищенный и осушенный жидкий диэлектрик.

Сильно окисленное масло с кислотным числом выше 0,4 мг КОН/г, претерпевшее процесс глубокого старения, нуждается в восстановлении (регенерации). Есть несколько способов регенерации масел*. Наиболее окисленные и постаревшие масла восстанавливают по кислотно-щелочноземельному методу. В этом случае в регенерируемое масло вводят 0,5 – 2 % крепкой серной кислоты. Кислота связывает все нестойкие соединения и переводит их в кислый гудрон. Отстоявшееся после этого масло обрабатывают щелочью

---

* См. литературу, посвященную уходу за маслом, например, Антов И. С., Хомяков М. В. Уход за изоляционным маслом. М., Энергия, 1973.

для нейтрализации органических кислот и остатков серной кислоты. Затем масло промывают дистиллированной водой и обрабатывают адсорбентами *, после чего фильтруют через фильтр-пресс или пропускают через центрифугу.

§ 11. Синтетические жидкие диэлектрики

Недостатками нефтяных электроизоляционных масел являются их горючесть, сравнительно невысокая температура вспышки их паров и малая величина диэлектрической проницаемости. Этих недостатков лишены синтетические жидкости, состоящие из хлорированных углеводородов. Типичным представителем их является совол. Он изготовляется посредством хлорирования расплавленного кристаллического вещества – дифенила $H_5C_6—C_6H_5$.

Через расплавленный дифенил пропускают хлор в присутствии катализатора (олово, железо и др.). При этом происходит реакция замещения атомов водорода атомами хлора в молекулах дифенила. Если будет замещено более четырех атомов водорода, то продукт получается маслообразным. В соволе атомами хлора замещено пять атомов водорода $Cl_3H_2C_6—C_6H_3Cl_2$.

Так как молекулы совола построены несимметрично, то они полярны и совол является полярным диэлектриком. Его диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 5{,}2$, т. е. совпадает с величиной диэлектрической проницаемости изоляционных бумаг, что увеличивает емкость конденсаторов и повышает электрическую прочность ($E_{пр}$) бумажной изоляции. Поэтому совол применяется в бумажных конденсаторах в качестве пропитывающего вещества. Величина $\operatorname{tg}\delta$ совола несколько больше, чем у нефтяных масел, а электрическая прочность близка к электрической прочности нефтяных изоляционных масел.

Совол является негорючим веществом, что составляет его главное преимущество перед нефтяным маслом. Однако он имеет существенные недостатки, ограничивающие его применение. У совола температура застывания 5 °С. Кроме того, совол обладает большой вязкостью, которая при 40 °С колеблется в пределах $(290)\cdot 10^{-6}$ м²/с, тогда как у нефтяного масла она равна $30\cdot 10^{-6}$ м²/с. Это исключает пропитку бумаги при комнатной температуре и требует подогрева совола до температуры 50 °С.

---

* Тонкодисперсные порошки, обладающие избирательной поглощаемостью.

Большим недостатком совола является его токсичность (ядовитость) в результате наличия в нем хлора. Поэтому совол необходимо хранить в хорошо закрывающейся таре. При работе с соволом надо быть осторожным, так как он вызывает раздражение слизистых оболочек.

С целью понижения вязкости и сохранения негорючести совола для него был найден разбавитель в виде негорючей жидкости – трихлорбензола $C_6H_3Cl_3$. Смесь 64 % совола и 36 % трихлорбензола получила название совтол-2, а смесь 90 % совола и 10 % трихлорбензола – совтол-10. Эти жидкости находят применение в производстве бумажных конденсаторов и в специальных трансформаторах. Совол и совтолы не воспламеняются, но пары их дают вспышку, которая не вызывает воспламенения самих жидкостей.

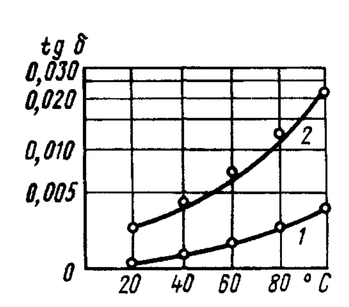


Рис. 13. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь нефтяного масла от температуры (при 50 Гц):

1 – свежее очищенное масло, 2 – масло, бывшее в эксплуатации

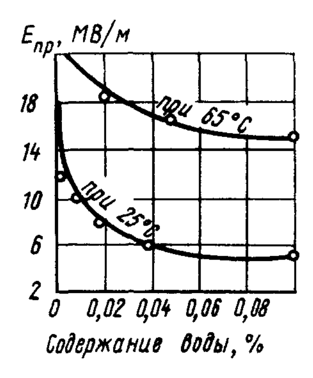


Рис. 14. Зависимость электрической прочности нефтяного масла от содержания в нем воды (при разной температуре масла)

Значительным достижением в области разработки синтетических жидких диэлектриков было получение кремнийорганических жидкостей с очень низкой температурой замерзания (–60 °С), стабильностью электрических характеристик в широком интервале температур и высокой стойкостью к окислению. Одной из широко применяемых кремнийорганических жидкостей является ПЭСЖ (ПЭС-Д). Эта жидкость принадлежит к группе кремнийорганических диэлектриков, молекулы которой представляют собой линейные цепочки типа

Таблица 4. **Основные характеристики синтетических изоляционных жидкостей**

Характеристики	Единица измерения	Совол	Сов ол-2	Совтол-10	ПЭСЖ (ПЭС-Д)
Плотность	кг/м^3	1560	1520	1540	960
Вязкость: при 20 °С	м^2/с	$290 \cdot 10^{-6}$ (при 40 °С)	$115 \cdot 10^{-6}$	$650 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$
при 65 °С	м^2/с	$28 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6}$	–
Температура вспышки паров (не менее)	°С	200	200	200	150
Температура застывания (не выше)	°С	+5	–40	–7	–60
Кислотное число	мг КОН/г	0,02	0,01	0,01	–
Удельное объемное сопротивление при 20 °С	Ом · м	10^{13}	10^{12}	10^{12}	10^{14}
Диэлектрическая проницаемость	–	5,2	4,6	4,8	2,6
Тангенс угла диэлектрических потерь при 50 Гц	–	0,005	0,008	0,006	0.0003
Электрическая прочность при 65 °С	МВ/м	18	20	20	25 (при 20 °С)

$$
\begin{array}{ccccccccc}
 & C_2H_5 & & C_2H_5 & & C_2H_5 & & C_2H_5 & \\
 & | & & | & & | & & | & \\
H_5C_2O - & Si & - O - & Si & - O - & Si & - O - & Si & - OC_2H_5 \\
 & | & & | & & | & & | & \\
 & C_2H_5 & & C_2H_5 & & C_2H_5 & & C_2H_5 &
\end{array}
$$

Основные характеристики синтетических жидких диэлектриков представлены в табл. 4 При сравнении данных табл. 3 и 4 видно, что электрические характеристики синтетических жидкостей уступают по уровню соответствующим характеристикам нефтяных масел хорошей очистки.

Следует заметить, что все электроизоляционные жидкости весьма гигроскопичны и присутствие в них влаги и примесей резко ухудшает их электрические характеристики (рис. 13 и 14). Хранить электроизоляционные жидкости надо в герметически закрытой таре.

§ 12. Электрическая проводимость и пробой жидких диэлектриков

Электрическая проводимость жидких диэлектриков обусловлена перемещением ионов. Последние образуются в результате диссоциации (распада) молекул примесей (воды, кислот и др.), а частично и молекул самого жидкого диэлектрика.

В загрязненных жидких диэлектриках, находящихся в эксплуатации, кроме ионной электрической проводимости имеется еще и моллионная Последняя обусловлена перемещением электрически заряженных коллоидных частиц воды и смолистых веществ, образующихся в результате старения жидких диэлектриков. Рост тангенса угла диэлектрических потерь в связи с повышением температуры (см. рис. 13) обусловлен увеличением электрической проводимости жидких диэлектриков. У очищенного жидкого диэлектрика рост $\operatorname{tg}\delta$ значительно меньше по сравнению с диэлектриком, бывшим в эксплуатации. Это объясняется значительно меньшей электропроводностью очищенного диэлектрика.

Электрическая прочность жидких диэлектриков в значительной степени зависит от имеющихся в нем коллоидных частиц воды, смолистых веществ и других загрязнений, взвешенных в жидком диэлектрике. Под действием электрических сил заряженные частички воды или смолистых веществ выстраиваются в виде цепочек, по которым развивается электрический заряд, т. е. происходит пробой жидкого диэлектрика. С увеличением содержания воды электрическая

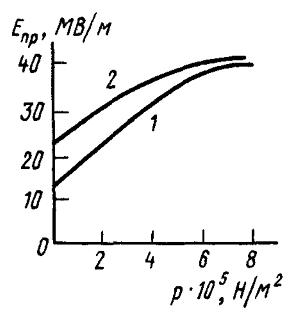


Рис. 15. Зависимость электрической прочности нефтяного масла от давления:

1 – техническое масло, 2 – дегазированное масло

прочность жидкого диэлектрика сильно понижается (см. рис. 14). С повышением температуры часть коллоидных частиц воды или смолистых веществ растворяется и образование токопроводящего канала в жидком диэлектрике затрудняется. В связи с этим электрическая прочность жидкого диэлектрика повышается (см. рис. 14).

Аналогично коллоидным частицам воды ведут себя и пузырьки газов. Будучи ионизированными, они под действием электрических сил образуют газовый канал между металлическими частями, находящимися под высоким напряжением. В этом случае электрический разряд происходит в газовом канале. Электрическая прочность жидких диэлектриков, содержащих воздух и другие газы, в большой степени зависит от давления (рис. 15), что находится в соответствии с законом Пашена *. Электрическая прочность дегазированного жидкого диэлектрика в меньшей степени зависит от давления. Повышение уровня электрических характеристик жидких диэлектриков достигается тщательной очисткой их от различных загрязнений и влаги, а также дегазацией, т. е. вакуумной обработкой жидких диэлектриков.

§ 13. Высокополимерные твердые материалы

Высокополимерные материалы состоят из молекул большой величины. Последние включают в себя десятки и сотни тысяч молекул каких-либо простых веществ, называемых *мономерами*. Мономеры – вещества, легко вступающие в химические реакции. В результате этих реакций и образуется новое высокополимерное вещество (полимер) с большой молекулярной массой.

В молекулах полимера молекулы мономера прочно связаны друг с другом силами химической связи, это условно изображают черточками. Например, молекулы исходного вещества

---

* См. § 8.

«А» соединяются друг с другом, образуя молекулу нового высокополимерного вещества

—А—А—А—А—А—А—А—

Большие молекулы полимеров могут иметь форму вытянутых в длину иитей, т. е. иметь линейную структуру.

Полимеры, состоящие из молекул линейной структуры, называются *линейными полимерами*. Они способны размягчаться при нагревании, т. е. являются *термопластичными материалами*.

Есть полимеры, состоящие из молекул, развитых по трем направлениям в пространстве. Такие полимеры называются *пространственными*. Они относительно хрупки и, как правило, не размягчаются при нагревании, т. е. являются *термореактивными материалами*.

Полимеры могут иметь аморфное или кристаллическое строение. Некоторые полимеры могут быть смешанными — кристаллическими и аморфными.

Высокополимерные вещества могут быть природными (янтарь, натуральный каучук и др.) и синтетическими (полистирол, поливинилхлорид и др.).

Ввиду ограниченности свойств природных полимеров современная электротехника использует главным образом синтетические высокополимерные диэлектрики. Они могут быть получены в результате химических реакций полимеризации или поликонденсации и соответственно называются полимеризационными или поликонденсационными диэлектриками.

§ 14. Твердые полимеризационные диэлектрики

Полимеризация — это процесс соединения молекул исходного (мономерного) вещества в большие молекулы высокополимерного вещества без изменения его элементарного состава.

Рассмотрим в качестве примера процесс получения синтетического диэлектрика — **полистирола**. Он получается в результате полимеризации исходного вещества — стирола, который представляет собой прозрачную бесцветную жидкость, кипящую при температуре 145 °С. Если в нее ввести перекись бензоила (0,1 – 0,5 % мас.), то при нагревании смеси до 110 °С начинает протекать реакция полимеризации. При этом двойная химическая связь в молекулах стирола $H_2C{=}CH{-}C_6H_5$ разрывается и переходит на такую же соседнюю молекулу.

В результате этого молекулы стирола соединяются друг с другом, образуя большую молекулу высокополимерного вещества — полистирола.

Этот процесс можно записать в виде следующей схемы:

$$-CH_2-\underset{\displaystyle C_6H_5}{\underset{|}{H}}-CH_2-\underset{\displaystyle C_6H_5}{\underset{|}{H}}-CH_2- \rightarrow (-CH_2-\underset{\displaystyle C_6H_5}{\underset{|}{CH}}-)_n$$

Степень полимеризации полистирола $n = 6000$*, а молекулярная масса его равна 300 000 – 600 000. Молекулярная масса исходного вещества — стирола равна 104.

В начальной стадии полистирол представляет собой густую прозрачную жидкость, которую разливают в подогретые стеклянные формы, где процесс полимеризации заканчивается. Из форм получают твердый прозрачный материал в виде пластин и стержней. Полистирол можно получить также в гранулах (которые представляют собой частицы цилиндрической формы диаметром 3 – 5 мм и длиной 8 – 10 мм) или в виде порошка (эмульсионный полистирол).

Основные характеристики полистирола: плотность 1050 кг/м³; $\sigma_р = (300 \div 500) \cdot 10^5$ Н/м²; $a = 12 \div 18$ кДж/м²; теплостойкость (по Мартенсу) 75 – 80 °С; водопоглощение 0,03 % мас.; холодостойкость −60 °С; $\rho_v = 10^{13} \div 10^{14}$ Ом · м; $\varepsilon = 2{,}4$; $\operatorname{tg}\delta = (2 \div 4) \cdot 10^{-4}$; $E_{пр} = 25 \div 30$ МВ/м.

Полистирол — термопластичный диэлектрик, размягчающийся при 110 – 120 °С; растворяется в неполярных растворителях: бензоле, толуоле, ксилоле, четыреххлористом углероде и некоторых других неполярных жидкостях.

Из полистирола изготовляют каркасы катушек, изоляционные панели, основания и изоляторы для электроизмерительных приборов.

Полистирол состоит из молекул линейной структуры, но они расположены в материале хаотически. Вытягивание размягченного полистирола через щели-фильтры (экструзия) позволяет ориентировать молекулы в направлении вытягивания материала и получать гибкие полистирольные пленки (стиропленки) толщиной от 20 до 100 мкм и шириной от 10 до 300 мм. Они обладают такими же высокими электроизоляционными свойствами, как и полистирол в толстом слое, а электрическая прочность у полистирольных пленок значительно выше: $E_{пр} = 80 - 100$ МВ/м. Полистироль-

---

* n — степень полимеризации показывает, из скольких молекул исходного вещества (мономера) состоит молекула полимера.

ные пленки применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в производстве конденсаторов.

Основным недостатком полистирола и изделий из него является хрупкость, т. е. сравнительно невысокая ударная вязкость и склонность к растрескиванию. Эти недостатки в значительной степени устранены в ударопрочных полистиролах (смесь полистирола с синтетическими каучуками или сополимеры стирола с некоторыми синтетическими каучуками). Ударопрочные полистиролы отличаются повышенными значениями ударной вязкости ($a = 40 \div 50$ кДж/м^2) и несколько увеличенными значениями диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 3{,}0 \div 3{,}6$). Остальные характеристики ударопрочного полистирола практически остаются на том же уровне, что и у обычных видов полистирола. Ударопрочный полистирол выпускается в гранулах.

Полиэтилен – твердый непрозрачный материал белого или светло-серого цвета, несколько жирный на ощупь, который получают из газа этилена ($H_2C{=}CH_2$) посредством его полимеризации под давлением.

Различают полиэтилен высокого (ВД), среднего (СД) и низкого (НД) давления*.

Процесс получения полиэтилена ВД протекает при давлениях $1500 \cdot 10^5$ Па и при температурах 180–200 °С в присутствии кислорода (0,05 %). Полиэтилен НД получают при давлении $(1 \div 5) \cdot 10^5$ Па и температуре 60 °С, но с применением специальных катализаторов. Полиэтилен СД получают при давлении $30 \cdot 10^5$ Па и температуре 130–140 °С. Во всех случаях образуется молекула линейной структуры с небольшим количеством боковых метильных групп CH_3

$$
\begin{array}{l}
-CH-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_2- \rightarrow (-H_2C-CH_2-)_n
\end{array}
$$

Степень полимеризации полиэтиленов $n = 3000 \div 5000$, а молекулярная масса от 20 000 до 400 000 и выше.

Полиэтилены НД и СД отличаются от полиэтилена ВД несколько большей плотностью, повышенной механической прочностью и большей жесткостью, но они менее устойчивы к тепловому старению.

Полиэтилены содержат от 55 (ВД) до 90 % (СД) кристаллического вещества, поэтому у них наблюдается отчетливо

* Полиэтилен ВД называют также полиэтиленом низкой плотности, а полиэтилены СД и НД – полиэтиленами высокой плотности.

выраженная температура плавления, которая находится в пределах от 108 °С (ВД); 125 °С (НД) до 130 °С (СД).

Полиэтилены – термопластичные материалы. Они поступают на заводы в виде гранул. Из полиэтиленов изделия получают методом литья под давлением, горячим прессованием и методом экструзии. Метод экструзии применяют при нанесении полиэтиленовой изоляции на провод, а также при изготовлении изоляционных шлангов и трубок.

Из полиэтилена ВД получают также электроизоляционные полупрозрачные пленки толщиной от 30 до 200 мкм и шириной от 1 до 1,5 м.

Из более твердых сортов полиэтилена (СД, НД) изготовляют негибкие электроизоляционные изделия: каркасы катушек, платы и др. При комнатной температуре полиэтилены не растворяются ни в одном из растворителей. Только при 70 °С и выше полиэтилены растворяются в ксилоле, четыреххлористом углероде, в хлорированных углеводородах и минеральных маслах.

Основные характеристики полиэтиленов: ВД – плотность 920 кг/м^3; $\sigma_р = (100 \div 150) \cdot 10^5$ Н/м^2; при ударе не ломается; теплостойкость (по Мартенсу) 55–60 °С; СД – плотность 940 кг/м^3; $\sigma_р = 270 \cdot 10^5$ Н/м^2; при ударе не ломается; теплостойкость 85 °С; НД – плотность 960 кг/м^3; $\sigma_р = 230 \cdot 10^5$ Н/м^2; при ударе не ломается; теплостойкость 70 °С; холодостойкость всех полиэтиленов –60 °С; водопоглощение не превышает 0,004 % (за 30 суток нахождения в воде).

Электрические характеристики полиэтиленов находятся практически на том же уровне, что и у лучших сортов полистирола. Следует заметить, что все полиэтиленовые изделия нестойки к солнечному свету. Для повышения светостойкости в полиэтилены вводят сажу и другие красители. Изделия из полиэтилена могут быть сварены между собой.

Основным недостатком полиэтилена ВД является невысокая теплостойкость (55–60 °С) и склонность к растрескиванию при повышенных механических нагрузках.

Для устранения этих недостатков полиэтилен подвергают вулканизации при введении в него органических перекисей и последующей термической обработке. При этом линейные молекулы полиэтилена соединяются друг с другом, образуя пространственно развитые большие молекулы. В результате этого получают вулканизирующийся полиэтилен с повышенной теплостойкостью (до 90 °С) и повышенной стойкостью к растрескиванию. Электрические характеристики вулканизированного полиэтилена остаются на высоком уровне. Другой

способ улучшения термомеханических свойств полиэтилена состоит в воздействии на полиэтилен ионизирующего облучения, например, потока электронов, получаемых из ускорителя. В результате такой обработки получают изоляцию проводов и кабелей из облученного полиэтилена, отличающегося повышенной нагревостойкостью (до 100 °С) и большей механической прочностью.

Поливинилхлорид (полихлорвинил) представляет собой порошок белого цвета, из которого получают горячим прессованием или горячим выдавливанием механически прочные изделия (платы, трубы и др.), стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам и кислотам.

Порошкообразный поливинилхлорид получают в результате реакции полимеризации газообразного вещества — винилхлорида $H_2C{=}CH{-}Cl$ в присутствии перекиси водорода и др.

Реакция проводится со сжиженным винилхлоридом в водном растворе щелочных веществ (водно-эмульсионная полимеризация). Как полистирол и полиэтилен, поливинилхлорид является термопластичным материалом. Горячим прессованием порошкообразного поливинилхлорида получают твердый, жесткий материал — **винипласт** в виде листов, пластин, труб и стержней. Он отличается химической стойкостью к минеральным маслам, разбавленным щелочам и кислотам. Винипластовые изделия обладают высокой механической прочностью, особенно к ударным нагрузкам, и имеют хорошие электроизоляционные свойства.

Основные характеристики винипласта: плотность 1350 кг/м^3; $\sigma_р = (400 \div 500) \cdot 10^5$ Н/м^2; $a = 100 \div 120$ кДж/м^2; теплостойкость (по Мартенсу) 60—70 °С; холодностойкость — $(15 \div 25)$ °С; водопоглощение 0,4—0,6 % мас.; $\rho_v = 10^{10} \div 10^{12}$ Ом·м; $\varepsilon = 4$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}01 \div 0{,}02$; $E_{пр} = 20 \div 22$ МВ/м.

Винипласт легко формуется в металлических формах при 150—160 °С. Изделия из винипласта поддаются всем видам механической обработки (обточка, фрезерование и др.), а также легко свариваются и склеиваются. Их можно окрашивать в разные цвета. Из поливинилхлорида изготовляют баки для аккумуляторов и различные электроизоляционные детали (платы и др.), стойкие к ударным нагрузкам.

Недостатками винипласта являются его малая холодостойкость и сравнительно малая теплостойкость. Разложение винипласта наступает при температуре 180—200 °С.

Поливинилхлоридный пластикат — гибкий рулонный материал, получаемый из порошка поливинилхлорида, смешанного

с пластификаторами – густыми маслообразными жидкостями (дибутилфталат и др.). Пластификаторов вводится от 30 до 45 %. Кроме пластификаторов, в поливинилхлоридный пластикат вводят красители, наполнители и термостабилизаторы. Все эти вещества перемешивают с порошкообразной полихлорвиниловой смолой и полученную смесь пропускают несколько раз между нагретыми стальными вальцами. В результате такой переработки получают гибкий, эластичный материал – поливинилхлоридный пластикат в виде лент толщиной от 0,8 до 2,5 мм и шириной до 400 мм в рулонах, а также в виде крошки (гранулы). Листовой пластикат изготовляют в листах толщиной от 1 до 5 мм и площадью 600 × 100 $мм^2$.

Основные характеристики пластиката*: плотность 1300–1400 $кг/м^3$; $\sigma_р = (180 \div 250) \cdot 10^5$ $Н/м^2$; холодостойкость – $(40 \div 50)$ °C; водопоглощение 0,2–0,5 % мас.; температура разложения 200–250 °C; $\rho_V = 10^8 \div 10^{12}$ Ом · м; $\varepsilon = 4 \div 6$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}05 \div 0{,}08$; $E_{пр} = 15 \div 25$ МВ/м.

Поливинилхлоридный пластикат широко применяется в качестве основной изоляции монтажных проводов, а также для изготовления защитных оболочек – шлангов кабелей. Поливинилхлоридный пластикат обычно бывает окрашен в черный, синий, желтый, красный и другие цвета. Красители вводятся в пластикат с целью защиты материала от светового старения, а также для распознавания проводов при монтаже. Поливинилхлоридный пластикат без красителей – прозрачный материал с желтоватым оттенком. Из поливинилхлоридного пластиката изготовляют гибкие изоляционные трубки и липкую изоляционную ленту. Характерной особенностью поливинилхлоридных материалов является то, что, будучи вынесены из пламени, они прекращают свое горение.

Полиформальдегид – твердый термопластичный диэлектрик, образующийся в результате полимеризации газообразного формальдегида. Структура молекул полиформальдегида линейная

$$—CH_2—O—CH_2—O—CH_2—O—$$

Материал представляет собой порошок белого цвета, из которого получают изделия литьем под давлением или экструзией.

* Значительно худшими электрическими характеристиками обладают пластикаты, идущие для изготовления защитных кабельных шлангов (шланговые пластикаты).

Характерными особенностями полиформальдегида являются большое содержание кристаллической фазы (75 %), что обеспечивает материалу повышенные механические характеристики и ярко выраженную температуру плавления (180 °С). Он обладает повышенной твердостью, большой стойкостью к истиранию и малым коэффициентом трения. Эти свойства позволяют изготовлять из полиформальдегида бесшумные шестеренные и червячные передачи и подшипники.

Довольно широкий интервал рабочих температур (от -55 до 100 °С), влагостойкость, химическая стойкость, стойкость к искровым разрядам и хорошие электрические характеристики обеспечивают широкую область применения полиформальдегида в качестве электроизоляционного материала. Из него изготовляют изоляционные основания (платы), каркасы катушек сложного профиля и др. Изделия из полиформальдегида могут быть подвергнуты всем видам механической обработки: фрезерованию, обточке, сверлению и др.

Основные характеристики полиформальдегида: плотность 1400 кг/м^3; $\sigma_р = (600 \div 700) \cdot 10^5$ Н/м^2; $a = 80 \div 90$ кДж/м^2; теплостойкость (по Мартенсу) 100 °С; холодостойкость -50 °С, водопоглощение 2 %; $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом · м; $\varepsilon = 3{,}0$; $\operatorname{tg}\delta = (3 \div 5) \cdot 10^{-3}$; $E_{пр} = 25$ МВ/м.

Органическое стекло (полиметилметакрилат) представляет собой высокополимерный термопластичный прозрачный материал, легко окрашиваемый во многие цвета. Его выпускают в виде листов толщиной от 0,8 до 24 мм и более, площадью от 400×500 мм^2 до 1400×1600 мм^2, а также в виде порошка. Органическое стекло – материал аморфного строения. Оно обладает очень высокой оптической прозрачностью (пропускает до 92 % лучей видимой области спектра).

Исходным материалом для получения органического стекла служит жидкое вещество – метилметакрилат. В него вводят небольшое количество (0,1 %) перекиси бензоила и пластифицирующие вещества (маслообразные жидкости). Последние уменьшают хрупкость органического стекла. Смесь исходных компонентов перемешивают в никелевом сосуде и после подогрева разливают в нагретые (до 120 °С) формы, изготовленные из обычного силикатного стекла или металла. После охлаждения формы разбирают и у полученных листов и пластин органического стекла обрезают края.

Для получения органического стекла в виде порошка процесс полимеризации метилметакрилата производят в водном растворе щелочных веществ.

Основные характеристики органического стекла: плотность 1180 кг/м^3; $\sigma_р = (600 \div 700) \cdot 10^5$ Н/м^2; $a = 12 \div 18$ кДж/м^2;

теплостойкость (по Мартенсу) 60—80 °С; холодостойкость $-(50 \div 60)$ °С; $\rho_v = 10^{10} \div 10^{11}$ Ом·м; $\varepsilon = 3,6$; $\operatorname{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-2}$; $E_{пр} = 15 \div 18$ МВ/м.

Органическое стекло устойчиво к разбавленным кислотам и щелочам, а также к бензину и минеральным маслам. Оно растворяется в ароматических углеводородах (бензоле, толуоле, ксилоле), хлорированных углеводородах (хлорбензоле, трихлорбензоле и др.), ацетоне и некоторых других растворителях. В нагретом состоянии (115—135 °С) органическое стекло легко формуется в стальных или деревянных пресс-формах. Наилучшие результаты достигаются формовкой разогретых заготовок под вакуумом.

Органическое стекло поддается всем видам механической обработки (сверлению, фрезерованию и др.). Для предохранения органического стекла от царапин при его механической обработке материал предварительно оклеивают бумагой. Детали из органического стекла легко склеиваются дихлорэтановым клеем. Этот клей получается растворением стружки органического стекла в дихлорэтане (5 г стружки на 100 г дихлорэтана). Склеиваемые поверхности должны быть хорошо подогнаны и промыты растворителем (ацетон и др.). Места склеивания подвергают сдавливанию в течение 2—4 ч. Органическое стекло и изделия из него можно также сваривать в специальных устройствах при температуре 140—150 °С с применением давления на свариваемые поверхности.

Капрон* представляет собой твердый материал белого или светло-желтого цвета. Это тоже синтетический материал, получаемый в результате полимеризации капролактама — порошкообразного вещества с температурой плавления 70 °С. Полученный полимер — капрон выдавливают через отверстие в дне автоклава в виде узкой ленты. Последняя попадает в ванну с проточной водой, где отмывается от низкомолекулярных веществ, ухудшающих свойства капрона. Отмытая и остуженная в воде капроновая лента поступает на рубильную машину и рубится на кусочки — крошку длиной 10 и толщиной 2—3 мм. Полученную крошку подвергают дополнительной промывке теплой водой, а затем сушат. Высушенную капроновую крошку доставляют и хранят в резиновых мешках, так как она способна поглощать влагу из воздуха.

Как и полиэтилен, капрон содержит кристаллическую

* Капрон относится к группе синтетических материалов, называемых полиамидами. Некоторые из них получают в результате реакции поликонденсации (см. § 15).

и аморфную фазы, которые сочетаются друг с другом, поэтому у капрона наблюдается хорошо выраженная температура плавления (215 °C). Он очень устойчив против плесневых грибков, но не устойчив к атмосферным воздействиям. Для повышения стойкости капрона к атмосферным воздействиям в него вводят стабилизаторы (0,3—0,5 %).

Основные характеристики капрона: плотность 1140 кг/м^3; $\sigma_р = (500 \div 700) \cdot 10^5$ Н/м^2; $a = 100 \div 150$ кДж/м^2; теплостойкость (по Мартенсу) 50—60 °C; водопоглощение 3 % мас.; $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом·м; $\varepsilon = 4{,}0$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}04$; $E_{пр} = 18 \div 20$ МВ/м.

Как и у других полимерных материалов, у капрона наблюдается медленная деформация (холодная текучесть) под действием постоянной нагрузки. Если деформация находится в пределах до 3 %, то после снятия нагрузки она исчезает.

В электрической изоляции находит применение капроновое волокно, получаемое вытяжкой через фильеры (малые круглые отверстия диаметром 0,1 мм и менее) размягченной капроновой смолы. Капроновое волокно обладает большой механической прочностью и повышенным сопротивлением истиранию. Оно применяется в качестве изоляции обмоточных и некоторых типов монтажных проводов, а также в качестве основы электроизоляционных лакированных тканей.

Значительное применение капрон получил в производстве электромонтажных и конструкционных деталей, отличающихся малой массой.

§ 15. Твердые поликонденсационные диэлектрики

Поликонденсация — это процесс соединения молекул нескольких исходных (мономерных) веществ в большие молекулы высокополимерного вещества. Как правило, реакция поликонденсации протекает в несколько этапов.

Диэлектрики, полученные в результате реакции поликонденсации, обладают несколько пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с диэлектриками, полученными в результате полимеризации. Основными причинами этого является наличие в поликонденсационных диэлектриках побочных веществ — воды, кислот, которые, разлагаясь на ионы, увеличивают электропроводность материала. Из поликонденсационных диэлектриков наибольшее применение в электротехнике получили резольные, новолачные, полиэфирные и эпоксидные смолы.

Резольные смолы являются термореактивными веществами, которые в своей конечной стадии не размягчаются при

нагревании. Переход в неплавкое и нерастворимое состояние у резольных смол совершается в три стадии. Только что полученная смола находится в первоначальной стадии А (резол). Она размягчается при нагреве и растворяется в растворителях. При дальнейшем нагревании резольная смола переходит в стадию В, в которой она еще может размягчиться (при 95 °С), но уже не растворяется в растворителях. При последующем нагревании смола переходит в конечную стадию С. В этой стадии резольная смола состоит из больших трехмерных молекул и уже не способна плавиться и растворяться. Это свойство резольных смол используется в производстве термореактивных пластмасс (гетинакс, текстолит и др.).

Из резольных смол наибольшее применение в электротехнике имеет бакелитовая смола (бакелит). Она образуется в результате реакции поликонденсации, протекающей между кристаллическим фенолом (C_6H_5—OH) и формалином (40 %-ный раствор газа – формальдегида CH_2O в воде) в присутствии щелочного катализатора – гидроксида бария $Ba(OH)_2$ или гидроксида аммония NH_4OH – в виде 25 %-ного раствора в воде. Формальдегид берется в избытке.

Для получения бакелитовой смолы определенное количество компонентов (фенол, формалин и катализатор) загружают в реактор, где они перемешиваются вращающейся мешалкой. Затем смесь нагревают до 95 °С. При этой температуре начинается реакция поликонденсации, в результате которой в нижней части реактора образуется густая сиропообразная масса коричневого цвета. Это бакелитовая смола в первоначальной стадии А. После сушки под вакуумом (при 60 °С) смолу разливают в металлические противни.

Охлажденная (до комнатной температуры) бакелитовая смола представляет собой твердое хрупкое вещество коричневого цвета. Ее применяют в качестве связующего вещества в пластмассах, а также для получения бакелитовых лаков. Чтобы получить спиртовой бакелитовый лак, этиловый спирт вводят в варочный котел для растворения высушенной смолы в стадии А. Обычно получают лак с содержанием 50–60 % бакелитовой смолы.

С целью экономии этилового спирта широко применяют жидкие водно-эмульсионные бакелитовые смолы, содержащие 15–20 % воды. Спиртовыми лаками и жидкими смолами пропитывают волокнистые основы (бумага, ткани), применяемые для производства слоистых электроизоляционных материалов – гетинакса, текстолита, стеклотекстолита и др.

Если вместо кристаллического фенола взять крезол (жидкое вещество) и провести поликонденсацию между крезолом и формальдегидом, то получится крезолформальдегидная смола. Эта смола тоже относится к резольным смолам. Она обладает более высокими электроизоляционными свойствами.

Все резольные смолы являются полярными диэлектриками, поэтому их диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 5 \div 6$*. В своей конечной стадии С резольные смолы обладают стойкостью к минеральным маслам и воде, но они не стойки к электрическим искрам. Под действием искровых разрядов поверхность резольных смол легко обогащается углеродом, в результате чего создаются науглероженные токопроводящие дорожки. Вследствие этого пластмассовые изделия, изготовленные на основе резольных смол, не рекомендуется применять там, где возможно образование сильных электрических искр.

Новолачные смолы (новолаки)*, как и резольные, получают в результате реакции поликонденсации между фенолом и формальдегидом, но при недостатке формальдегида. При этом применяют кислотный катализатор – соляную кислоту.

Полученная новолачная смола представляет собой густую массу светло-коричневого цвета, которую в нагретом состоянии разливают в противни. В остуженном состоянии новолачная смола представляет собой твердое хрупкое вещество, растворяющееся в этиловом спирте и ацетоне. Электроизоляционные свойства новолачных смол ниже, чем у резольных.

Новолачные смолы являются термопластичными веществами. Они сохраняют плавкость и растворимость при длительном хранении и даже при нагревании до 200 °С. Новолачные смолы могут быть переведены в неплавкое и нерастворимое состояние при взаимодействии их (в нагретом состоянии) с уротропином $(CH_2)_6N_4$. Этим пользуются для получения быстро прессующихся пластмасс на основе новолачных смол. Для этого в порошкообразную новолачную смолу вводят 15–20 % уротропина (порошок белого цвета). Из полученной смеси прессуют в стальных нагретых пресс-формах пластмассовые детали для электрических аппаратов низкого напряжения (основания и крышки выключателей, патронов), а также конструкционные детали (кнопки, рукоятки и др.).

---

* Резольные и новолачные смолы представляют собой полуфабрикаты электроизоляционных материалов, поэтому их характеристики не приводятся.

Глифталевые смолы (глифтали)* относятся к группе полиэфирных смол, получаемых поликонденсацией многоатомных спиртов (гликоль, глицерин и др.) и органических кислот (фталевая, малеиновая и др.).

Глифталевые смолы получают в результате реакции поликонденсации глицерина и фталевого ангидрида при избытке последнего.

Для обеспечения достаточной гибкости глифталевые смолы модифицируют, т. е. в процессе поликонденсации в них вводят жирные кислоты и растительные масла, например касторовое. Отличительной особенностью глифталевых смол является их высокая клеящая способность при хороших электрических характеристиках, стойкость к поверхностным разрядам и повышенная нагревостойкость до 130 °С (класс В).

Глифталевые смолы в электротехнике используются как основы для клеящих, пропиточных и покровных лаков, пленки которых (после запекания) оказываются стойкими к нагретому минеральному маслу.

Клеящие глифталевые лаки нашли большое применение для клейки слюды в производстве твердой и гибкой слюдяной изоляции (миканиты, микаленты).

Лавсан – прозрачный высокополимерный диэлектрик кристаллического или аморфного строения. Как и глифтали, он относится к полиэфирам. Лавсан кристаллического строения получают в результате реакции поликонденсации терефталевой кислоты и этиленгликоля. Изготовленные из него прозрачные лавсановые пленки толщиной 30 – 100 мкм находят применение в качестве пазовой изоляции в электрических машинах. Часто лавсановую пленку наклеивают на электротехнический картон или на стеклянную ткань и в таком сочетании применяют в качестве пазовой изоляции в электрических машинах. Лавсановые пленки стойки к растворителям, содержащимся в лаках, а также к плесневым грибкам и влаге и поэтому могут применяться в электрических машинах и аппаратах тропического исполнения. Лавсановые пленки могут длительно работать при температурах, не превышающих 120 °С (класс нагревостойкости Е).

При довольно большой электрической прочности лавсановые пленки нестойки к электрической короне. Поэтому область применения их ограничивается электрооборудованием низкого напряжения. При длительном нахождении в трансфор-

---

* Глифталевые смолы – полуфабрикаты электроизоляционных материалов, поэтому их характеристики не приводятся.

маторном масле при 110 – 120 °С пленки приобретают хрупкость.

Основные характеристики лавсана (пленки): плотность 1400 кг/м^3, теплостойкость 70 – 75 °С; холодостойкость – 60 °С; водопоглощение 1,5 % мас.; $\sigma_p = (1800 \div 2000) \cdot 10^5$ Н/м^2; $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}5$; $\mathrm{tg}\,\delta = (2 \div 6) \cdot 10^{-3}$; $E_{пр} = 130 \div 150$ МВ/м.

Эпоксидные смолы представляют собой сиропообразные жидкости или твердые вещества желтой или светло-коричневой окраски. Жидкие эпоксидные смолы являются низкомолекулярными веществами, но при большой молекулярной массе (свыше 1000) эпоксидные смолы представляют собой твердые вещества.

Эпоксидные смолы получаются в результате реакции поликонденсации хлорированного глицерина с резорцином или дианом (дифенилолпропан). Процесс образования смолы происходит в щелочной среде. Молекулы эпоксидных смол содержат так называемые эпоксидные группы

$$\begin{array}{c} \mathrm{O} \\ / \quad \backslash \\ \mathrm{H_2C — CH}, \end{array}$$

откуда произошло название этих смол.

Эпоксидные смолы нашли широкое применение в электротехнике как основы электроизоляционных заливочных компаундов, а также в качестве клеящих лаков и клеев. Достоинством эпоксидных компаундов является очень малая объемная усадка (0,6 – 1,0 %) при их отвердевании. Кроме того, затвердевшие эпоксидные смолы обладают большой механической прочностью и стойкостью к воде.

В качестве отвердителей применяются ангидриды малеиновой и фталевой кислот и другие вещества (пиридин и др.). В зависимости от состава применяемого отвердителя процесс отверждения жидкой эпоксидной смолы может протекать при нагревании до 100 – 160 °С или при комнатной температуре.

Основные характеристики эпоксидных смол в отвержденном состоянии: плотность 1200 кг/м^3; $\sigma_p = (300 \div 600) \cdot 10^5$ Н/м^2; $a = 8 \div 18$ кДж/м^2; водопоглощение 0,05 % мас.; теплостойкость (по Мартенсу) 100 – 110 °С; $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}8$; $\mathrm{tg}\,\delta = (2 \div 5) \cdot 10^{-3}$; $E_{пр} = 20 \div 25$ МВ/м.

§ 16. Нагревостойкие высокополимерные диэлектрики

Рассмотренные ранее высокополимерные органические диэлектрики могут длительно использоваться при температурах

до 90—105 °С и только некоторые из них, например глифталевые смолы, — до 130 °С. Таким образом, подавляющее большинство органических диэлектриков может длительно работать при температурах, не превышающих 90—105 °С (классы нагревостойкости Y и А). При превышении указанных температур органические диэлектрики в результате теплового старения быстро разрушаются.

Высокой нагревостойкостью обладают электроизоляционные материалы неорганического происхождения, например электрокерамические материалы (фарфор, стеатит), но из них невозможно изготовить гибкие виды изоляции. Как показали исследования, основной причиной низкой нагревостойкости высокополимерных органических диэлектриков является сравнительно малая энергия химической связи между атомами углерода, составляющими основы молекул органических диэлектриков. Так, например, энергия химической связи между атомами углерод - углерод (С—С) равна 58,6 ккал/моль.

При нагревании диэлектриков в процессе их использования до температуры, при которой тепловая энергия будет выше энергии химической связи, они претерпевают тепловое старение, т. е. разрушаются. Надо было изыскать новые виды диэлектриков, которые бы состояли из молекул с большей энергией связи.

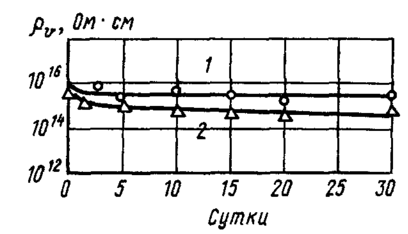


Рис. 16. Зависимость удельного объемного сопротивления пленок кремнийорганического лака от времени пребывания при температуре 180 °С и времени выдержки в воде: 1 — выдержки при 180 °С, 2 — выдержка в воде

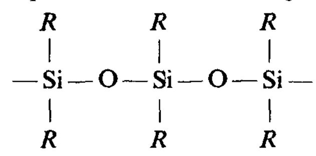
В результате многочисленных исследований были разработаны новые кремнийорганические высокополимерные диэлектрики*.

Основу молекул этих диэлектриков составляет силоксановая группировка атомов —Si—O—Si—, энергия связи которой равна 89,6 ккал/моль. Вследствие этого кремнийорганические диэлектрики обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с органическими диэлектриками, рассмотренными ранее.

---

* Большие работы по изысканию и разработке высокополимерных кремнийорганических диэлектриков проведены акад. К. А. Андриановым и его сотрудниками.

Название «кремнийорганические диэлектрики» обусловлено тем, что в состав их молекул, кроме атомов кремния и кислорода, входят остатки различных органических соединений: CH_3, C_2H_5, C_6H_5 и др. Эти органические остатки называются *органическими радикалами* и обозначаются буквой *R*. В общем виде молекула кремнийорганических высокополимерных диэлектриков может быть представлена так



В зависимости от присоединенных органических радикалов и от числа последних, приходящихся на один атом кремния, могут быть получены жидкие, каучукоподобные и твердые диэлектрики. Это либо бесцветные вещества, либо имеющие окраску от бледно-желтой до коричневой. Отличительной особенностью всех кремнийорганических диэлектриков является их высокая нагревостойкость и холодостойкость. Кремнийорганические электроизоляционные материалы (пластмассы, резины, лаки и др.) могут длительно работать в интервале температур от -60 до 180 °С, а некоторые из них до 220 °С. Кроме того, кремнийорганические диэлектрики отличаются высокой стойкостью к воде, минеральным маслам, а также к электрическим искровым разрядам. Эти диэлектрики не растворяются в минеральных маслах и не науглероживаются под действием электрических искр.

Электрические характеристики кремнийорганических диэлектриков находятся на высоком уровне и мало изменяются при нагревании (рис. 16) и при воздействии воды. Их электрические характеристики следующие: $\rho_v = 10^{14} \div 10^{15}$ Ом · м; $\varepsilon = 2{,}6 \div 3{,}5$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0003 \div 0{,}005$; $E_{пр} = 30 \div 55$ МВ/м (у лаковых пленок $E_{пр} = 80 \div 120$ МВ/м).

Кремнийорганические материалы являются слабополярными диэлектриками.

Фторопласт-4. Значительным достижением в области разработки нагревостойких диэлектриков явилось получение твердого высокополимерного материала фторопласта-4. Это негорючий, жирный на ощупь материал белого цвета. Он получается в результате полимеризации сжиженного газа — тетрафторэтилена $F_2C{=}CF_2$. Образующийся полимер представляет собой рыхлый порошок, из которого прессованием (в стальных пресс-формах) получают различные изделия.

Чтобы образовался плотный монолитный материал, отпрессованные при комнатной температуре изделия подвергают спеканию в печах. При быстром охлаждении нагретых до 370 °C заготовок и изделий материал имеет аморфное строение, а при медленном охлаждении он приобретает микрокристаллическую структуру. Последняя обеспечивает материалу хорошую обрабатываемость и стабильность его свойств.

Основной особенностью фторопласта-4 является его исключительно высокая нагревостойкость (250 °C) и холодостойкость (−269 °C). При нагреве до 327 °C (точка перехода) его кристаллическая структура переходит в аморфную и материал приобретает прозрачность. При нагреве до температуры 415 °C материал не размягчается, но начинается термическое разложение его с отщеплением свободного фтора, являющегося токсичным веществом.

Основной причиной весьма высокой нагревостойкости фторопласта-4 является большая величина энергии химической связи между атомами углерода и фтора (107 ккал/моль) в его молекуле. Фторопласт-4 отличается также исключительной химической стойкостью. Он не растворяется ни в одном из растворителей как при комнатной температуре, так и при нагреве; на него не действует ни одна из концентрированных кислот и щелочей. Водопоглощение фторопласта-4 равно нулю, и он не смачивается водой.

Основные характеристики фторопласта-4: плотность 2100 кг/м^3; $\sigma_р = (140 \div 250) \cdot 10^5$ Н/м^2; $a = 100 \div 130$ кДж/м^2; $\rho_v = 10^{15} \div 10^{17}$ Ом · м, $\varepsilon = 2{,}0$; $\mathrm{tg}\,\delta = (2 \div 4) \cdot 10^{-4}$; $E_{пр} = 30$ МВ/м (у пленок $E_{пр} = 100 \div 180$ МВ/м).

Фторопласт-4 неполярный диэлектрик, вследствие чего его электрические характеристики стабильны в широком диапазоне частот. Применение в электротехнике имеют тонкие (от 10 до 200 мкм) пленки.

Отрицательным свойством фторопласта-4 является его текучесть при комнатной температуре, т. е. он начинает деформироваться при напряжениях в материале от $130 \cdot 10^5$ Н/м^2 и выше. Поэтому на изделия из фторопласта-4 нельзя допускать механические нагрузки, создающие в материале напряжения выше $130 \cdot 10^5$ Н/м^2.

Наряду с фторопластом-4 наша промышленность выпускает разновидности этого диэлектрика: фторопласт-4Д, фторопласт-40 и др. Они отличаются от фторопласта-4 формой, размерами частиц порошкообразной массы и более широкими возможностями переработки этих типов фторопласта в изделия. Значения механических и электрических характеристик

фторопласта-4Д и фторопласта-40 очень мало отличаются от значений соответствующих характеристик фторопласта-4.

Полиимиды — новые нагревостойкие органические диэлектрики, могущие длительно использоваться при температурах 200—220 °С. Полиимидные электроизоляционные изделия (пластмассы) могут использоваться при температурах до —155 °С и ниже, а электроизоляционные полиимидные пленки могут длительно выдерживать низкие температуры (—190 °С), на разрушаясь. Полиимиды являются химически стойкими диэлектриками. Они не растворяются в большинстве органических растворителей, на них не действуют разбавленные кислоты, минеральные масла и вода. Разрушение полиимидов вызывают концентрированные кислоты, щелочи и перегретый водяной пар.

Полиимиды представляют собой диэлектрики, получаемые в результате реакции поликонденсации ангидрида пиромеллитовой кислоты и некоторых ароматических соединений — диаминов. На основе полиимидов изготовляют эмаль-лаки для эмалирования обмоточных проводов. Эти провода могут длительно работать при температурах до 220 °С.

Из полиимидов получают гибкие полупрозрачные электроизоляционные пленки светло-желтой или коричневой окраски. Полиимидные пленки выпускаются толщиной от 5 до 100 мкм и более.

Основные характеристики пленок: $\sigma_р = (1000 \div 1200) \times 10^5$ Н/м²; $\rho_v = 10^{15}$ Ом·м; $E_{пр} = 100 \div 150$ МВ/м. Влагопоглощаемость пленок относительно большая и составляет в среднем 1 % за 24 ч нахождения пленок в парах воды при 20 °С, поэтому обмоточные провода с пленочной полиимидной изоляцией необходимо пропитывать нагревостойкими и водостойкими лаками.

Накладываемую на провода полиимидную пленку подклеивают к проводу с помощью клеящего полиимидного лака.

Полиимидные пленки применяют также в качестве пазовой изоляции в электрических машинах нагревостойкого исполнения.

На основе термопластичных полиимидов изготовляют различные пластмассовые изделия электроизоляционного и конструкционного назначения. Для этого используют как чистые полиимиды, так и наполненные стекловолокном и другими нагревостойкими наполнителями. Изделия из полиимидов изготовляют литьем и прессованием при температурах 350—400 °С.

Отличительными особенностями полиимидных пластмасс

являются легкость переработки в изделия благодаря большой текучести полиимидов, малая объемная усадка и стабильность свойств при переработке.

Полиимидные пластмассы обладают высокой нагревостойкостью (220—250 °С), хорошими электрическими и механическими характеристиками. Так, ударная вязкость у ненаполненных полиимидов составляет $a = 35 \div 50$ кДж/м^2, а у наполненных стекловолокном $a = 110 \div 130$ кДж/м^2.

Водопоглощение полиимидных пластмассовых изделий не превосходит 0,8 % после кипячения в воде в течение 24 ч. Все пластмассы на основе полиимидов обладают очень высокой радиационной стойкостью.

§ 17. Электроизоляционные резины

Характерным свойством всех резин является их большая эластичность, т. е. свойство резин сильно удлиняться при растяжении без остаточного удлинения после снятия растягивающей нагрузки. Следует также отметить высокую водостойкость и газонепроницаемость резин и их хорошие электроизоляционные характеристики. Основным компонентом всех резин является натуральный (НК) или синтетический (СК) каучуки. Это полимеры, обладающие двойными химическими связями, склонными к соединению молекул каучука друг с другом в процессе вулканизации. В результате этого получают высокоэластичный, упругий материал, обладающий водостойкостью и газонепроницаемостью.

Для проведения процесса вулканизации в исходную резиновую смесь вводят серу (1—3% мас.) или тиурам. Для ускоренного процесса вулканизации в исходную резиновую смесь еще вводят ускорители процесса вулканизации. Это сложные органические вещества, например каптакс.

Следующими компонентами резиновых смесей являются наполнители. К активным наполнителям, повышающим механическую прочность резин, относятся цинковые белила и углеродистая сажа. Среди неактивных наполнителей наибольшее применение имеют мел, тальк и каолин, которые вводят с целью удешевления резин.

В исходные резиновые смеси еще вводят мягчители (стеариновая кислота, парафин и др.) и противостарители (неозон). Мягчители улучшают пластичность сырых резин, что облегчает наложение резиновой изоляции на жилы проводов, а также снижают температуру их вулканизации.

Противостарители повышают стойкость резиновой изоляции к окислению, тепловому и световому старению. Известно,

что под действием нагрева, света и окислителей (кислород, озон) резиновая изоляция становится хрупкой и растрескивается.

Иногда в резиновые исходные составы вводят красители: железный сурик, цинковые белила и др. Красители понижают изоляционные свойства резин.

Ниже приведен состав одной исходной резиновой смеси (сырой резины).

На 100 % массы каучука вводят следующее количество компонентов: наполнителей – 20 – 90 %; вулканизаторов – 1 – 3 %, ускорителей – 1 – 2 %, противостарителей – 0,5 – 3 %, пластификаторов – 2 – 50 %, красителей – 0,5 – 3,0 %. Смешение всех компонентов производят в специальных смесителях при температуре 100 – 140 °С.

Сырая резина обладает пластичностью и легко накладывается и обволакивает голую жилу провода, образуя его основную изоляцию. Процесс нанесения сырой резины на жилу провода производят на специальных экструзионных машинах *. Таким же способом наносят защитные резиновые оболочки на кабели. Для этой цели применяют шланговые резины с пониженными изоляционными свойствами.

Чтобы сырая резина обладала эластичностью, достаточной механической прочностью и высоким уровнем электрических характеристик, ее подвергают вулканизации. *Вулканизация* – есть процесс тепловой обработки слоя сырой резины на проводах при температуре 140 – 200 °С в зависимости от состава сырой резины. Так, для резин на кремнийорганическом каучуке температура вулканизации составляет 180 – 200 °С, а сам процесс вулканизации производят в два этапа. Для большинства других резин температура вулканизации 140 – 160 °С.

Для проведения вулканизации провода, покрытые слоем сырой резины, наматывают на металлические барабаны, которые загружают в вулканизационные котлы. В паровую рубашку котла и в его внутреннее пространство впускают насыщенный водяной пар под давлением 0,5 – 2,0 МПа или нагретый воздух. Процесс вулканизации длится 30 – 70 мин и более.

В процессе вулканизации сера или тиурам вступают в химическую реакцию с молекулами каучука, соединяя их друг с другом поперечными мостиками. Это придает резинам бóльшие механическую прочность и изоляционные свойства

---

* Применяют и другие способы нанесения резиновой изоляции на провода.

по сравнению с каучуками. Часть серы, непрореагировавшая с молекулами каучука, оставаясь свободной, может выделяться на поверхности резины и, соприкасаясь с поверхностью медной жилы, вступает с ней в реакцию, образуя сернистую медь (CuS). Последняя вредно действует на резину. Во избежание этого резиновую изоляцию накладывают на луженую медную проволоку. На алюминиевую проволоку резиновую изоляцию можно накладывать непосредственно.

В результате проведенной вулканизации получают электроизоляционные резины со следующими основными характеристиками: $\sigma_р = 3{,}5 \div 4{,}5$ МПа; $e_р = 250 \div 300\,\%$, $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}5 \div 4{,}5$; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}008 \div 0{,}01$; $E_{пр} = 20 \div 45$ МВ/м. Повышенными значениями электрических и механических характеристик обладают резины, применяемые для изоляции жил кабелей на напряжения выше 1000 В. У шланговых резин уровень электрических характеристик ниже, а механических характеристик – выше по сравнению с электроизоляционными резинами. Так, разрушающее усилие при растяжении у шланговых резин $\sigma_р = 5 \div 11$ МПа.

Некоторые составы шланговых резин обладают масло- и бензостойкостью и не распространяют горения.

Рабочие температуры резиновой изоляции на основе натурального и синтетических каучуков находятся в пределах от $-(50 \div 70)$ до $+(65 \div 85)$ °С. Исключение составляют резины на кремнийорганическом каучуке, у которых интервал рабочих температур очень широкий: от -100 до $+200$ °С.

§ 18. Лаки и эмали

Лаки представляют собой коллоидные растворы* каких-либо пленкообразующих веществ в специально подобранных органических растворителях.

К пленкообразующим веществам относятся смолы (природные и синтетические), растительные высыхающие масла, эфиры целлюлозы** и др. В качестве растворителей пленкообразующих веществ применяют легкоиспаряющиеся (летучие) жидкости: бензол, толуол, ксилол, спирты, ацетон, скипидар и др.

---

* Коллоидные растворы отличаются от молекулярных (истинных) тем, что состоят из некристаллизующихся частичек, которые по размерам превосходят молекулу.

** Эфиры целлюлозы – аморфные вещества, получающиеся в результате химической переработки растительной клетчатки.

Для разбавления загустевших лаков в них вводят разбавители, которые отличаются от растворителей меньшей испаряемостью. В качестве разбавителей применяют бензин, лаковый керосин, скипидар и некоторые другие жидкости.

В состав лака могут еще входить пластификаторы и сиккативы.

Пластификаторы – вещества, придающие лаковой пленке эластичность; к ним относятся касторовое масло, жирные кислоты льняного масла и др.

Сиккативы представляют собой жидкие или твердые вещества, вводимые в некоторые лаки, чтобы ускорить их высыхание.

При сушке слоя лака, нанесенного на какую-либо поверхность, содержащиеся в нем органические растворители улетучиваются (испаряются), а пленкообразующие вещества в результате процессов полимеризации образуют твердую лаковую пленку. Эта пленка может быть гибкой (эластичной) или негибкой и хрупкой в зависимости от свойств пленкообразующих веществ, составляющих лаковую основу.

По своему назначению электроизоляционные лаки делятся на пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки применяют для пропитки обмоток в электрических машинах и аппаратах с целью цементации (соединения) витков обмотки друг с другом, а также с целью устранения пористости в изоляции обмоток. Пропиточный лак, проникая в поры изоляции обмоток, вытесняет оттуда воздух и после своего отвердевания делает обмотку влагостойкой. При этом повышается электрическая прочность изоляции обмотки и ее коэффициент теплопроводности. Одной из главных характеристик пропиточных лаков является их пропитывающая способность. Чем меньше вязкость лака, тем больше его пропитывающая способность.

Покровные лаки применяют для создания на поверхности уже пропитанных обмоток влагостойких или маслостойких лаковых покрытий. К покровным лакам также относятся эмальлаки, применяемые для эмалирования обмоточных проводов, а также лаки, применяемые для изоляции листов электротехнической стали и других деталей.

Клеящие лаки применяют для склеивания различных электроизоляционных материалов: листочков слюды (в производстве слоистой слюдяной изоляции), керамики, пластмасс и др. Основное требование, предъявляемое к клеящим лакам, состоит в том, чтобы эти лаки обладали хорошим прилипанием (адгезией) и образовывали бы прочный шов.

Все лаки по способу сушки делятся на две группы:

лаки воздушной (холодной) и лаки печной (горячей) сушки.

У лаков воздушной сушки отвердевание пленки происходит при комнатной температуре. К ним относятся шеллачные, эфироцеллюлозные и некоторые другие.

У лаков печной сушки отвердевание пленки возможно лишь при температурах значительно выше комнатной (от 100 °С и выше). В лаках печной сушки применяют термореактивные пленкообразующие вещества (глифталевые, резольные и другие смолы), отвердевание которых обусловлено процессами полимеризации, требующими повышенных температур. Лаки горячей сушки, как правило, обладают более высокими механическими и электрическими характеристиками.

Электроизоляционные эмали представляют собой лаки с введенными в них мелкораздробленными веществами – пигментами.

В качестве пигментов применяют неорганические вещества, преимущественно оксиды металлов (оксид цинка, железный сурик, литопон* и др.) и их смеси. Пигментирующие вещества, введенные в лак, тщательно перетирают в краскотерочных машинах до получения однородной массы. В процессе высыхания эмалей пигменты вступают в химические реакции с лаковой основой, образуя плотное покрытие с повышенной твердостью.

Электроизоляционные эмали являются покровными материалами. Ими покрывают лобовые части обмоток электрических машин и аппаратов с целью защиты их от смазочных масел, влаги и других воздействий.

Основой многих электроизоляционных эмалей являются масляно-глифталевые лаки, характеризующиеся высокой клеящей способностью и повышенной нагревостойкостью. На масляно-глифталевых лаках изготовляют эмали нескольких марок: СПД – эмаль горячей сушки (105 °С), покрытия из из этой эмали имеют серый цвет и обладают стойкостью к минеральным маслам и к электрическим искрам; СВД – эмаль холодной сушки, образует покрытия серого цвета, стойкие к минеральным маслам; КВД – эмаль холодной сушки, образует покрытия красно-коричневой окраски, стойкие к электрическим дугам.

Эмали на эпоксидных лаках отличаются хорошим прилипанием (адгезией) и повышенной нагревостойкостью (до 155 °С).

Большой интерес представляют электроизоляционные эма-

---

* Литопон – смесь сернистого цинка с сернокислым барием, придает эмали белый цвет.

Таблица 5. **Основные характеристики электризоляционных лаков**

Классификация лака по основе	Марка (номер) лака	Время сушки, ч (при температуре, °C)	Термоэластичность* пленок, ч (температура испытания, °C)	Электрические характеристики при 20 °C		Область применения
				ρ_v, Ом·м	$E_{пр}$, мВ/м	
Масляный	152	1(105)	1–3(105)	$10^{11}-10^{12}$	50–60	Пропиточные и покровный лак. Применяются при ремонтах электрических машин
Масляно-битумный	БТ-987	5–6(105)	8–10(150)	$10^{12}-10^{13}$	55–60	Пропиточный лак. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с изоляцией классов А и Е
	БТ-988	3(105)	5–6(150)	$10^{12}-10^{13}$	55–60	То же

Глифталевый	ГФ-95	2(105)	48 – 50(150)	$10^{12} - 10^{13}$	70 – 75	Пропиточный и покровный лак для обмоток, работающих в масле
	МЛ-2	1 – 2(105)	48 – 50(150)	$10^{12} - 10^{13}$	65 – 70	Пропиточный и покровный лак с повышенной цементирующей способностью
Кремнийорганический	КО-964	1 – 2(200)	200 – 250(200)	$10^{13} - 10^{14}$	75 – 80	Пропиточный лак с высокой нагревостойкостью (до 200 °С) и водостойкостью
	КО-923	25 – 30 мин (200)	100 – 120(200)	$10^{12} - 10^{13}$	60 – 65	Пропиточный лак с повышенной нагревостойкостью (до 200 °С) и водостойкостью

* Термоэластичность – время испытания пленок лака или эмали (нанесенных на медную фольгу) при заданной температуре, по истечении которого появляются признаки старения (трещины).

Таблица 6. **Основные характеристики электроизоляционных эмалей**

Марка эмали*	Лаковая основа эмали (лак)	Время сушки и температура, °С	Термоэластичность пленок, ч, температура испытания, °С	Электрические характеристики при 20 °С		Область применения
				ρ_v, Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	
ГФ-92-ГС (СПД)	Глифталевый	3(105)	10(150)	$10^{11}-10^{12}$	50—60	Эмаль горячей сушки образует пленки серого цвета, стойкие к искрам и минеральному маслу. Применяется для покрытия вращающихся и неподвижных обмоток
ГФ-92-ХС (СВД)		20(20)	1(150)	$10^{10}-10^{11}$	30—32	Эмаль холодной сушки образует пленки серого цвета, стойкие к искрам и минеральному маслу. Применяется для покрытия неподвижных обмоток.
ЭП-91	Эпоксидный	2(180)	6(150)	$10^{12}-10^{13}$	50—70	Нагревостойкая (130 °С) горячей сушки образует пленки, стойкие к влаге и минеральному маслу. Сушка ступенчатая: 2 ч при 20 °С и 2 ч при 150 °С
КО-918	Кремнийорганический**	2(200)	150(200)	$10^{12}-10^{13}$	60—70	Нагревостойкая эмаль образует твердые пленки розового цвета, обладающие повышенной стойкостью к минеральному маслу и воде. Нагревостойкость 180 °С
КО-935	То же**	2(130)	80(200)	$10^{11}-10^{12}$	40—60	То же, но высыхает при пониженной температуре (120 °С). Образуемые пленки обладают стойкостью к воде и грибковой плесени. Нагревостойкость 180 °С

* В скобках показаны прежние обозначения эмалей.

** Все кремнийорганические эмали применяются для покрытия обмоток (электрических машин и аппаратов), пропитаных кремнийоргаиическими лаками.

ли на основе кремнийорганических лаков, отличающиеся очень высокой нагревостойкостью (180–200 °С).

В табл. 5 и 6 приведены основные характеристики нескольких электроизоляционных лаков и эмалей*.

§ 19. Компаунды

Компаунды – это электроизоляционные составы, изготовляемые из нескольких исходных веществ: смол, битумов. В момент применения компаунды представляют собой жидкости, которые постепенно отвердевают, превращаясь в монолитный твердый диэлектрик.

В отличие от лаков и эмалей компаунды не содержат летучих растворителей. При сушке слоя лака растворители испаряются и, улетучиваясь, образуют в пленке лака сквозные поры и капилляры. Это приводит к снижению влагостойкости изоляции, пропитанной лаком. Отсутствие в компаундах растворителей обеспечивает монолитность компаунду после его отвердевания. Согласно своему назначению компаунды разделяются на пропиточные, заливочные и обмазочные.

Пропиточные компаунды применяются для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с целью цементации витков обмотки и защиты их от влаги; **заливочные** – для заливки полостей (свободных пространств) в кабельных муфтах и воронках, а также в корпусах электрических аппаратов – трансформаторов тока, дросселей и т. п.

Компаунды могут быть термореактивными материалами, не способными размягчаться после своего отвердевания, или термопластичными, могущими размягчаться при последующем нагреве. К термопластичным относятся компаунды на основе битумов, воскообразных диэлектриков (парафин, церезин и др.), термопластичных полимеров (полистирол и др.).

Широкое применение в электротехнике получили термопластичные компаунды на основе битумов, так как последние являются дешевыми материалами, стойкими к воде, и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Например, для пропитки обмоток электрических машин широко применяется битумный пропиточный компаунд № 225, который получают в результате сплавления битума, канифоли и льняного масла, взятых в определенном соотношении.

---

* Подробней см.: Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М., Высшая школа, 1982.

В твердом состоянии компаунд № 225 представляет собой массу черного цвета с блестящей поверхностью.

Основные характеристики компаунда № 225: плотность 950 кг/м^3, температура размягчения (по методу «кольца и шара») 98–112 °С; холодостойкость – 25 °С; объемная усадка 7–8 %; $\rho_v = 10^{10} \div 10^{12}$ Ом·м; $E_{пр} = 18 \div 20$ МВ/м.

Для пропитки обмоток компаунд нагревается до 160–170 °С. При этой температуре он переходит в жидкое состояние и тогда частицы его становятся способными проникать внутрь пропитываемой обмотки. Пропитка обмоток жидкими битумными компаундами производится в специальных пропиточных котлах, закрываемых герметически. Обмотки, помещенные в пропиточные котлы, вначале сушатся под вакуумом при температуре 100–180 °С*. Затем в пропиточный котел впускается разогретый жидкий компаунд, который начинает проникать в открытые поры изоляции обмоток. После этого давление в котле повышают до $(6 \div 8) \cdot 10^5$ Па. Под воздействием давления жидкий компаунд проникает в поры изоляции обмоток и одновременно опрессовывает их. Пропитанные обмотки подвергают дополнительной сушке. Для различных обмоток и компаундов разрабатываются разные режимы пропитки.

В результате пропитки получается монолитная изоляция обмоток с повышенной механической и электрической прочностью и стойкая к парам воды.

Битумы являются термопластичными материалами, поэтому битумные компаунды применяют, как правило, для пропитки неподвижных обмоток. Из вращающихся обмоток (при перегреве их) битумный компаунд может вытекать (особенно под действием центробежных сил). Битумными компаундами также нельзя пропитывать обмотки, работающие в трансформаторном масле или подвергающиеся воздействию бензина, керосина, так как все битумы растворяются в минеральных маслах и в углеводородах (бензин, бензол и др.).

Из заливочных битумных компаундов наиболее широкое применение получили компаунды МБ-70, МБ-90, МБМ-1 и МБМ-2. Первые два компаунда изготовляют на основе нефтяных битумов, взятых в разных соотношениях. Компаунды МБМ-1 и МБМ-2 изготовляют на основе битумов, но для повышения их холодостойкости в них вводится еще трансформаторное масло. Перечисленные компаунды применяют для заливки полостей в кабельных соединитель-

---

* Температуру устанавливают в зависимости от класса нагревостойкости изоляции обмоток.

ных муфтах и концевых воронках напряжением до 10 кВ.

Большой практический интерес представляют термореактивные компаунды, которые не размягчаются при последующем нагревании. К ним относятся компаунды МБК, являющиеся одновременно пропиточными и заливочными, компаунды на основе эпоксидных смол и др.

Компаунды МБК * изготовляют на основе эфиров метакриловой кислоты с введенными в них отвердителями, пластификаторами или без них. В исходном состоянии компаунды МБК представляют собой прозрачные с желтоватым оттенком жидкости, которые при нагревании образуют твердые изоляционные блоки. В жидком состоянии компаунды МБК обладают хорошей пропитывающей способностью.

Компаунды МБК с введенными в них отвердителями отвердевают при 20 °С в течение 20–24 ч, а без отвердителей – 8–10 ч, но при нагреве их до 75 °С. В отвердевшем состоянии компаунды инертны по отношению к меди, стойки к воде и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Компаунд МБК-1 в отвердевшем состоянии представляет собой твердую неэластичную массу. Компаунды МБК-2 и МБК-3 образуют твердые эластичные массы, так как в них вводятся пластификаторы – маслообразные жидкости.

Компаунды МБК применяют в интервале температур от –60 до +110 °С (без наполнителя). При введении в компаунды минерального наполнителя они могут быть использованы при температурах от –60 до +120 °С.

В отвердевшем виде компаунды МБК обладают следующими характеристиками: плотность 1000 кг/м^3; $\sigma_p = (70 \div 80) \cdot 10^5$ Н/м^2 (МБК-1); $\sigma_p = (5{,}0 \div 11) \cdot 10^5$ Н/м^2 (МБК-2 и МБК-3); $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}2 \div 5{,}2$; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}03 \div 0{,}09$; $E_{пр} = 10 \div 15$ МВ/м. Объемная усадка (сокращение объема при отвердевании) у этих компаундов составляет 5–6 %.

Компаунды МБК поставляют в виде жидкостей. В жидком состоянии они могут растворять или вызывать набухание резины и пленок некоторых лаков. В присутствии резины компаунды МБК не отвердевают, что является их недостатком.

Большое применение получили **компаунды на основе эпоксидных смол.** Эти компаунды представляют собой смеси одной из эпоксидных смол с отвердителями (ангидриды фталевой и малеиновой кислот и другие вещества). Они

---

* Метакрил-бутиловый компаунд.

отличаются хорошей прилипаемостью (адгезией) к металлам, керамике, пластмассам и волокнистой изоляции обмоток; обладают повышенной механической прочностью и малой объемной усадкой (0,5–1,5 %). В зависимости от взятого отвердителя эпоксидные компаунды могут переходить из жидкого в твердое состояние при повышенных температурах (120–140 °С) или при комнатной температуре. Если в жидкую эпоксидную смолу ввести ангидриды фталевой или малеиновой кислот, то отвердение компаундов происходит при температуре 120–140 °С в течение 4–10 ч. При применении других отвердителей, например гексаметилендиамина и некоторых других, отвердевание эпоксидных компаундов протекает при комнатной температуре в течение 20–24 ч. Такие компаунды называются компаундами холодного отвердевания. Отвержденный эпоксидный компаунд представляет собой твердый блок, обладающий сравнительно небольшим коэффициентом линейного расширения ($\approx 6 \cdot 10^{-5}$ 1/°С). Для уменьшения хрупкости эпоксидных компаундов в них вводят пластификаторы – синтетические маслообразные жидкости: дибутилфталат, полиэфиры и др.

С целью повышения коэффициента теплопроводности эпоксидных компаундов и улучшения их механических характеристик в исходные жидкие составы вводят минеральные наполнители: пылевидный кварц, молотый тальк и др. Введение наполнителей приводит к снижению текучести жидкого компаунда. Компаунды с наполнителями применяют главным образом для заливки больших полостей с большим количеством металлических частей.

Основные характеристики эпоксидных отвержденных компаундов: плотность 1200–1700 кг/м³; $\sigma_р = (450 \div 600) \times 10^5$ Н/м²; $a = 8 \div 12$ кДж/м²; теплостойкость 80–110 °С; холодостойкость –(40–60) °С; $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}8 \div 5{,}0$; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}02 \div 0{,}05$; $E_{пр} = 10 \div 25$ МВ/м; водопоглощение (за 24 ч) 0,05–0,08 % мас.

Наибольшей механической прочностью обладают компаунды с введенными в них наполнителями (пылевидный кварц и др.).

В качестве нагревостойких пропиточных составов применяют кремнийорганические, а также эпоксиднокремнийорганические компаунды. Отличительной особенностью этих компаундов является их высокая нагревостойкость (до 180 °С) и холодостойкость (до –60 °С).

Отвердевание чистых кремнийорганических компаундов происходит ступенями – сначала при температуре 150 °С, а затем при 200 °С; объемная усадка составляет 5–6 %. Они

обладают малой вязкостью и высокой пропитывающей способностью. Применяются для пропитки обмоток электрических машин нагревостойкого и влагостойкого исполнения.

В отвердевшем состоянии эти компаунды могут работать в интервале температур от −60 до +200 °С. Они отличаются хорошими электрическими характеристиками: $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}0 \div 3{,}5$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}003$; $E_{пр} = 50 \div 60$ МВ/м.

§ 20. Бумаги и картоны

Из древесины хвойных пород (сосна, ель) путем ее химической переработки получают целлюлозу, или клетчатку, которая является сырьем для изготовления различных электроизоляционных бумаг и картонов. В состав дерева, помимо клетчатки, входят лигнин, смолистые и другие вещества, которые, оставаясь в целлюлозе, придают бумаге хрупкость и снижают электроизоляционные свойства. Чем меньше этих примесей в бумагах, тем они прочнее, эластичнее и тем они медленнее стареют. Поэтому при химической переработке древесины на целлюлозу, предназначенную для изготовления электроизоляционных бумаг, главной задачей является полное удаление из древесины лигнина, смол и других загрязняющих веществ и получение технически чистой целлюлозы.

Перед химической переработкой из древесины удаляют сучки и поврежденные гнилью места и дробят ее на щепу. Для превращения щепы в целлюлозу ее варят в закрытых котлах (автоклавах) с применением кислых или щелочных веществ — химикатов. Варку щепы проводят при температурах 150—175 °С и давлениях $(7-9)\cdot 10^5$ Па в кислотной или щелочной среде. В случаях кислотной варки в котел вводят раствор бисульфита кальция $Ca(HSO_3)_2$ в сернистой кислоте H_2SO_3, а в случае щелочной варки — смесь из едкого натра $NaOH$ и сернистого натрия Na_2S. В результате кислотной варки древесины получают так называемую сульфитную целлюлозу, а в результате щелочной варки — сульфатную целлюлозу.

Для изготовления электроизоляционных бумаг и картонов используют преимущественно сульфатную целлюлозу, которая придает лучшие электрические, механические и тепловые свойства бумаге.

Полученную после варки целлюлозу промывают водой, а затем подвергают мокрому размолу в специальных ваннах (ролах), снабженных вращающимся барабаном с ножами.

Дно ванны имеет выступ в виде горки. Попадая между ножами барабана и острым выступом горки, очищенные варкой волокна разрубаются на мелкие части и расщепляются вдоль на более тонкие волокна. В зависимости от величины зазора между ножами и выступом горки осуществляется жирный или тощий помол. Для жирного помола устанавливают тупые ножи на большом расстоянии от выступа горки на дне ванны. В результате происходит лишь расщепление или расчес на тонкие волокна. Таким образом, при жирном помоле волокна механически не разрушаются, а их капиллярные каналы остаются закрытыми. Для получения целлюлозы тощего помола применяют острые ножи. Расстояние между ними и горкой меньше, чем в первом случае. При этом волокна целлюлозы преимущественно рубятся поперек, в результате чего обнажаются внутренние каналы.

При жирном помоле волокна получаются длинными и тонкими. Бумага, изготовленная из целлюлозы жирного помола, обладает большей гибкостью и большой механической прочностью. Тощий же помол дает короткие толстые волокна, которые обусловливают рыхлость бумаги, малую механическую прочность, а также большую способность впитывать воду и другие жидкости.

Размолотая целлюлоза называется бумажной массой. Для изготовления бумаги массу подают на движущуюся металлическую сетку бумажной машины, к поверхности которой ее прижимают металлическими валками. Вода при этом отжимается и уходит через сетку, а масса формуется в полотно бумаги, которое затем переходит на суконную ленту. Здесь полотно бумаги сначала обминается холодными вальцами, потом проходит через систему нагретых чугунных валков, а затем обжимается системой холодных вальцов, после чего сматывается в рулон.

Влажность бумаг находится в пределах 5–9 %. С увеличением влажности бумаги ее электроизоляционные свойства и механическая прочность заметно ухудшаются. Важными характеристиками бумаги являются: плотность, разрушающее напряжение при растяжении, а также воздухопроницаемость. Воздухопроницаемость есть объем воздуха (в миллилитрах), проходящий за одну минуту через образец бумаги площадью 10 см^2 при разряжении $9 \cdot 10^3$ Па. Ясно, что наиболее плотные бумаги обладают меньшей воздухопроницаемостью, а следовательно, имеют капилляры и поры меньшего размера. Так, у конденсаторных бумаг воздухопроницаемость составляет 3–5 мл/мин, а у кабельных бумаг она равна 20–25 мл/мин.

Электроизоляционные бумаги делятся на кабельные, конденсаторные, пропиточные, намоточные, микалентные и крепированные.

Кабельная бумага составляет основную изоляцию кабелей высокого напряжения. Ее после намотки на кабель пропитывают электроизоляционным маслом. При намотке на кабельную жилу ленты из бумаги подвергают механическому натяжению. Поэтому кабельная бумага должна обладать достаточно высокой механической прочностью при растяжении. Кроме того, в готовом кабеле в процессе его укладки намотанная бумага может подвергаться изгибам и поэтому должна обладать значительной прочностью на перегибы.

Кабельные бумаги вырабатывают из сульфатной целлюлозы преимущественно жирного помола в целях обеспечения высоких механических свойств. Жирный помол, кроме этого, придает бумаге большую плотность и малую пористость. Пропитывающее жидкое вещество (масло или маслоканифольный состав) разбивается бумагой при пропитке на тонкие пленки и каналы, что повышает ее электрическую прочность. Электрическая прочность непропитанной кабельной бумаги составляет 6–9 МВ/м, а пропитанной трансформаторным маслом – 70–80 МВ/м.

Кабельные бумаги выпускают для изоляции жил силовых кабелей на напряжения: 35 кВ, 110 кВ и 220 кВ.

Перечисленные группы кабельных бумаг отличаются друг от друга количеством слоев, толщиной, объемной массой, воздухопроницаемостью и другими характеристиками.

Кабельные бумаги, маркируемые буквами* К (К-080; К-120; К-170) и КВ (КВ-030; КВ-045; КВ-080; КВ-120; КВ-170; КВ-240), выпускаются двухслойными, а бумаги, маркируемые буквами КМ (КМ-120; КМ-170) и КВМ (КВМ-080; КВМ-120; КВМ-170), состоят из трех и четырех слоев. Многослойные бумаги по сравнению с двухслойными обладают большей гибкостью, эластичностью и имеют меньшую воздухопроницаемость, а следовательно, и большую электрическую прочность. Плотность 760–850 кг/м^3.

Кроме перечисленных, выпускаются еще уплотненные кабельные бумаги, маркируемые буквами КВУ (толщина: от 0,15 мм до 0,120 мм) и КВМУ (КВМУ-080; КВМУ-120). Уплотненные бумаги отличаются большой плотностью – 1100 кг/м^3, меньшими отклонениями по толщине, меньшей

---

* Цифры показывают толщину бумаги в микронах, а буквы обозначают следующее: К – кабельная; КВ – кабельная высоковольтная, КВМ – кабельная высоковольтная многослойная; У – уплотненная.

воздухопроницаемостью, что обеспечивает им более высокие значения механических и электрических характеристик. Уплотненные кабельные бумаги применяются для изоляции жил кабелей на напряжения от 110 кВ и выше.

Все бумаги являются гигроскопичными материалами, легко увлажняются во влажном воздухе, поэтому все операции по наложению бумажной изоляции должны производиться в строго кондиционированных условиях окружающего воздуха. Перед пропиткой жидкими диэлектриками бумажная изоляция кабелей подвергается длительной сушке.

Конденсаторная бумага, пропитанная жидким диэлектриком, применяется в бумажных конденсаторах. Для изготовления этой бумаги используется наиболее чистая сульфатная целлюлоза жирного помола. Это самые тонкие бумаги (их толщина колеблется от 0,004 до 0,030 мм), однородные по толщине. Плотность 1000—1250 кг/м³. Воздухопроницаемость их невелика (3—10 мл/мин), что указывает на их сравнительно высокую электрическую прочность, которая колеблется от 19 до 65 МВ/м соответственно их толщине*.

После пропитки нефтяным конденсаторным маслом электрическая прочность конденсаторных бумаг повышается и находится в пределах от 250 до 300 МВ/м. Конденсаторные бумаги содержат минимальное количество токопроводящих частиц (неметаллические и др.), что обеспечивает высокий уровень электрических характеристик. Предел прочности при растяжении конденсаторных бумаг достигает $\sigma_p = 100 \cdot 10^5$ Н/м². Конденсаторная бумага выпускается в бобинах шириной от 12 до 750 мм.

Пропиточная бумага предназначается для изготовления слоистой электроизоляционной пластмассы — гетинакса. Пропиточная бумага вырабатывается из сульфатной целлюлозы и имеет толщину 0,09; 0,11 и 0,13 мм, а плотность 600—800 кг/м³. Поэтому у пропиточных бумаг воздухопроницаемость и впитываемость выше, чем у других бумаг, что необходимо для обеспечения хорошей пропитки бумаги в производстве гетинакса.

Намоточная бумага применяется для изготовления электроизоляционных намоточных изделий: цилиндров и изоляционных трубок для трансформаторов и электрических аппаратов.

Намоточная бумага вырабатывается из небеленой целлюлозы жирного помола, имеет плотность 750 кг/м³, толщину 0,05 и 0,07 мм, электрическую прочность не менее 8 МВ/м.

---

* С увеличением толщины электрическая прочность бумаги уменьшается.

Для изготовления электроизоляционных цилиндров бумага должна быть покрыта электроизоляционным лаком с одной стороны.

Микалентная бумага применяется для изготовления гибкой слюдяной ленты, для чего на полотно микалентной бумаги наклеивают листочки слюды. Микалентная бумага должна обеспечивать гибкость микаленты, повышать ее механическую прочность на разрыв и быть одновременно тонкой, чтобы не снижать электрических характеристик микаленты. Чтобы была возможна хорошая и быстрая пропитка лаками, эта бумага должна также обладать большой пористостью.

Для изготовления микалентной бумаги используется длинноволокнистый хлопок с волокнами, ориентированными преимущественно в направлении длины полотна бумаги. Это обеспечивает ей большую механическую прочность: в направлении вдоль полотна бумаги $750 \cdot 10^5$ Н/м^2, а поперек полотна $90 \cdot 10^5$ Н/м^2. Микалентную бумагу выпускают в рулонах шириной 450 и 900 мм. Толщина бумаги 18–20 мкм (0,018–0,020 мм).

Крепированная бумага применяется для изолирования отводов и мест соединений в обмотках трансформаторов и других маслонаполненных электрических аппаратах.

Эта бумага на поверхности имеет креп (гофрировку), нанесенный перпендикулярно направлению полотна бумаги. Благодаря этому крепированная бумага обладает гибкостью и хорошо растягивается в продольном направлении (удлинение 60 %), что позволяет надежно изолировать отводы от обмоток и сильно изогнутые соединительные провода, например в трансформаторах.

Крепированную бумагу изготовляют из небеленой сульфатной целлюлозы толщиной 0,17 мм (без крепа) и 0,5 мм (с крепом) плотностью 230 кг/м^3. Бумага выпускается в рулонах шириной 500 мм.

Применение крепированной электроизоляционной бумаги взамен дорогостоящих маслостойких лакотканей дало большой экономический эффект без снижения электрической прочности изоляции выводов.

Электроизоляционные картоны изготовляют тем же способом, что и бумаги, но они имеют бóльшую толщину (от 0,1 до 6,0 мм). Сырьем для изготовления картонов является масса из сульфатной целлюлозы или из смеси целлюлозы с хлопковым волокном (последнее обеспечивает повышенные механические и электроизоляционные свойства картона). Процесс производства картонов аналогичен процессу производства бумаг, но применяется несколько другое обору-

дование и вводятся дополнительные технологические операции по оформлению полотна картона и окончательной отделке. Картоны толщиной от 0,1 до 0,8 мм выпускают в рулонах шириной до 1015 мм; картоны толщиной от 1 мм и больше выпускают в листах разных размеров – до 3 × 4 м.

Картоны, предназначенные для работы на воздухе, так называемые «воздушные» картоны, изготовляют из смеси целлюлозы и хлопкового волокна. Они проходят дополнительную обработку стальными вальцами для уплотнения и полировки. В некоторые из картонов вводят клеящие вещества на основе канифоли и крахмала с целью уменьшения гигроскопичности и получения более плотной структуры.

Картоны, применяемые в маслонаполненных машинах и аппаратах (трансформаторах и др.), так называемые «масляные» картоны, изготовляют из смеси сульфатной целлюлозы и хлопкового волокна без дополнительной обработки на вальцах. Они имеют несколько рыхлую структуру, поэтому хорошо пропитываются маслом.

Картоны для работы на воздухе выпускают в листах и рулонах шириной до 1050 мм и толщиной от 0,1 до 3,0 мм. Плотность этих картонов составляет 950 – 1250 кг/м^3; разрушающее напряжение при растяжении $(8{,}5 \div 13) \cdot 10^5$ Н/м^2, электрическая прочность изменяется от 8 до 13 МВ/м в зависимости от толщины. Воздушные картоны применяют для пазовой и межвитковой изоляции в электрических машинах низкого напряжения.

Картоны для работы в масле выпускают толщиной от 0,5 до 3 мм, их плотность 900 – 1200 кг/м^3, разрушающее напряжение при растяжении $(4 \div 6) \cdot 10^5$ Н/м^2 (в поперечном направлении), электрическая прочность в пропитанном виде 38 – 60 МВ/м.

Фибру изготовляют из непроклеенной бумаги, имеющей в своем составе хлопковое волокно и древесную целлюлозу (по 50 %). Бумагу пропускают через ванну с нагретым (до 50 °С) раствором хлористого цинка, а затем наматывают на стальной барабан до определенной толщины. При обработке бумаги раствором хлористого цинка на ее поверхности образуется клейкое вещество. При намотке на барабан листы бумаги склеиваются друг с другом, образуя плотный материал – фибру, который разрезают на листы и прессуют. Непрореагировавший хлористый цинк удаляют из фибры посредством пропускания фибровых изделий (листы, стержни) через чаны с растворами хлористого цинка постепенно уменьшающейся концентрации. Окончательную промывку фибры производят водой.

Плотность фибры 1150 кг/м³. Она обладает высоким разрушающим напряжением при растяжении: $\sigma_р = (500 \div 700) \cdot 10^5$ Н/м² – в продольном направлении и $(300 \div 450) \cdot 10^5$ Н/м² – в поперечном.

Из фибры изготовляют листы толщиной от 0,6 до 20 мм и более, а также стержни и трубки. Фибра легко поддается механической обработке: пилится, сверлится, строгается и нарезается. Листовая фибра штампуется, а при размачивании водой из нее можно формовать изделия сложного профиля. Недостатками фибры являются гигроскопичность и набухание во влажной среде. После сушки фибра обнаруживает усадку, что затрудняет изготовление из нее точных деталей. Электрические характеристики ее невелики: $\rho_v = 10^6 \div 10^7$ Ом·м; $E_{пр} = 3,5 \div 5,0$ МВ/м.

В электротехнике фибра марки ФЭ (электротехническая) используется в качестве электроизоляционного материала в электрооборудовании низкого напряжения, например, в качестве пазовых клиньев и прокладок в электрических машинах невлагостойкого исполнения. Фибра применяется для изготовления разрядников высокого напряжения, в которых стенки фибрового цилиндра под действием электрической дуги интенсивно выделяют газы. В результате возрастающего давления газов внутри трубчатого разрядника дуга прекращает свое горение.

§ 21. Лакоткани, ленты и лакированные трубки

Лакоткани представляют собой гибкие рулонные материалы, состоящие из какой-либо тканевой основы, пропитанной электроизоляционным лаком. В качестве тканевых основ применяют хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (из стеклянного волокна) ткани. Лак, которым пропитывают тканевые основы, после отвердевания образует на лакоткани гибкую пленку, которая обеспечивает материалу высокие электроизоляционные свойства, тканевая же основа придает лакоткани механическую прочность. Лакоткани находят широкое применение в качестве пазовой и межвитковой изоляции в электрических машинах низкого напряжения, а также в трансформаторах*. Кроме того, лакоткани применяют для наружной изоляции катушек и отдельных групп проводов в электрических аппаратах и приборах. В большинстве случаев лакоткани используются в виде лент,

* В трансформаторах с масляной изоляцией применяют маслостойкие лакоткани марки ЛХММ-105.

вырезаемых под углом 45° по отношению к основе. Такие лакотканые ленты обеспечивают наибольшую эластичность, что дает возможность изолировать ими лобовые части обмоток и соединения фасонного профиля.

В соответствии с примененной тканевой основой лакоткани делят на хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (стеклолакоткани).

В качестве основ хлопчатобумажных лакотканей применяют тонкие прочные ткани (перкаль и др.). Основами шелковых лакотканей являются тонкие ткани (0,04 – 0,08 мм) из натурального шелка. Для некоторых сортов эластичных лакотканей с повышенной механической прочностью используют капроновые ткани. Для лакотканей с повышенной нагревостойкостью применяют стеклянные ткани, изготовленные из электроизоляционных (бесщелочных) стекол. Нагревостойкие стеклянные ткани пропитывают кремнийорганическими лаками, пленки которых могут работать при температурах до 180 °С.

Шелковые и капроновые ткани пропитывают светлыми масляными лаками. Хлопчатобумажные ткани пропитывают светлыми масляными или черными масляно-битумными лаками, обеспечивающими лакотканям повышенную влагостойкость.

Хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные лакоткани на масляных лаках по нагревостойкости относятся к классу А, т. е. они могут применяться при рабочих температурах, не превышающих 105 °С. Стеклолакоткани же на кремнийорганических лаках по нагревостойкости относятся к классу Н (180 °С) и обладают высокой влагостойкостью и стойкостью к грибковой плесени.

Стеклолакоткани, пропитанные кремнийорганическими составами, применяются в электрических машинах и аппаратах нагревостойкого и тропического исполнения.

Перед пропиткой лаками волокнистые тканевые основы (за исключением стеклотканей) проглаживают. Для этого ткань пропускают между нагретыми стальными валками (каландрами), чтобы все ворсинки пригладить к поверхности ткани. После каландрирования ткань подвергают пропитке электроизоляционным лаком в многоэтажной пропиточной машине. Готовую лакоткань из пропиточной машины получают в рулонах шириной от 800 до 1000 мм. Стеклоткани выпускают шириной от 700 до 1100 мм.

В табл. 7 приводятся основные характеристики некоторых электроизоляционных лакотканей.

Как и все волокнистые материалы, лакоткани обладают

Таблица 7. **Основные характеристики электроизоляционных лакотканей** *

Лакоткань	Марка	Толщина, мм	Разрушающее напряжение при растяжении (по основе),** Н/см	Удельное объемное сопротивление, Ом·м	Электрическая прочность, МВ/м
Хлопчатобумажная на масляных лаках	ЛХМ-105 ЛХМС-105	0,15–0,3 0,17–0,2	45–80	$10^{11}-10^{12}$ $10^{11}-10^{12}$	25–40 27–42
Хлопчатобумажная на маслянобитумном лаке	ЛХБ-105	0,17–0,24	50–75	$10^{11}-10^{12}$	26–40
Шелковая на масляных лаках	ЛШМ-105 ЛШМС-105	0,08–0,15 0,04–0,15	22–30 10–30	$10^{12}-10^{13}$ $10^{12}-10^{13}$	28–58 20–42
Стеклянная на кремнийорганических лаках	ЛСК-180 ЛСКР-180	0,05–0,2 0,12–0,2	25–170	$10^{12}-10^{13}$ $10^{12}-10^{13}$	30–40 36–55

* Подробней о лакотканях см.: Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М., Высшая школа, 1982.

** Бо́льшие значения относятся к лакотканям большей толщины.

наибольшим разрушающим напряжением при растяжении в направлении основы, т. е. вдоль полотна, меньшей прочностью — в направлении утка, т. е. поперек полотна ткани. Водопоглощение хлопчатобумажных лакотканей 4,5—7,0 %, шелковых 3,5—6,0 %, стеклянных 1—2,0 %.

Липкие электроизоляционные ленты изготовляют на основе хлопчатобумажных или стеклянных (стекловолокнистых) лент, а также на основе лент из поливинилхлоридного пластиката.

Прорезиненная хлопчатобумажная лента представляет собой миткалевую ленту, пропитанную вязким резиновым составом.

Изоляционную прорезиненную ленту выпускают в кругах диаметром 175 ± 25 мм, шириной 10, 15, 40 и 50 мм. Круги изоляционной прорезиненной ленты должны храниться при температуре не ниже +5 °С и не выше +25 °С, в противном случае лента быстро теряет липкость. Лента должна сохранять липкость после нагрева до 70 °С (в течение одних суток). Прорезиненная липкая лента применяется при монтажных работах для изоляции мест соединений проводов в сетях и устройствах низкого напряжения.

Значительное применение в устройствах низкого напряжения получила **липкая поливинилхлоридная лента.** Эта лента выпускается в кругах диаметром 80 ± 10 мм, шириной 15, 20, 25 и 50 мм. Толщина ленты 0,2—0,45 мм. Ее можно применять до температуры 60—65 °С, при более высоких температурах она начинает размягчаться.

Липкую нагревостойкую стеклоленту изготовляют из стеклянной ленты (из бесщелочного стекла), пропитанной нагревостойким кремнийорганическим лаком. Ее выпускают в кругах диаметром 150 ± 25 мм, шириной 10, 15, 20 и 25 мм и толщиной 0,12—0,15 мм. Она применяется для изоляции лобовых частей обмоток электрических машин и аппаратов с высокими рабочими температурами (до 180 °С). Пробивное напряжение стеклоленты толщиной 0,12 мм составляет 600—700 В, а для ленты толщиной 0,15 мм оно равно 750—850 В.

Хлопчатобумажные лакированные (линоксиновые) трубки представляют собой трубки (чулки) из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной масляным лаком. Они имеют внутренний диаметр от 0,5 до 16 мм и толщину стенки от 0,4 до 0,9 мм. Длина трубок составляет не менее 1000 мм. Пробивное напряжение трубок 5 кВ.

Линоксиновые трубки могут работать при температурах от —50 до +105 °С. Их применяют для изоляции выводных концов и мест соединений в электрических аппаратах,

а также в трансформаторах (сухих и с масляной изоляцией).

Лакированные лавсановые трубки – это трубки (чулки) из лавсанового шелка, пропитанные полиэфирными лаками. Трубки имеют внутренний диаметр от 0,5 до 10 мм и толщину стенки от 0,4 до 0,8 мм.

Лавсановые лакированные трубки по сравнению с линоксиновыми обладают значительно большей механической прочностью и сопротивлением истиранию. Одна группа лавсановых трубок может использоваться в интервале температур от –50 до +105 °С (марка ТПЛ), другая (марка ТЭЛ) от –50 до +130 °С. Трубки выпускают длиной от 1000 до 10 000 мм. Электрические характеристики лавсановых трубок находятся на том же уровне, что и у трубок линоксиновых: $\rho_v = 10^6 \div 10^7$ Ом·м; $E_{пр} = 4 \div 10$ МВ/м.

Лакированные стекловолокнистые трубки представляют собой трубки (чулки), изготовленные из стекловолокнистой пряжи и пропитанные масляным, эпоксидным или нагревостойким кремнийорганическим лаком. Стекловолокнистые лакированные трубки имеют внутренний диаметр от 0,5 до 10 мм и толщину стенки 0,4–0,6 мм. Стекловолокнистые лакированные трубки менее эластичны по сравнению с линоксиновыми и лавсановыми трубками, но обладают высокой влагостойкостью и применяются в электрических машинах и аппаратах с рабочей температурой от –50 до +180 °С (марка ТКС), остальные группы трубок могут применяться при температурах от –50 до +105 °С (марка ТЛС) и от –50 до +130 °С (марка ТЭС). Области применения стекловолокнистых трубок те же, что и линоксиновых и лавсановых. Все рассмотренные виды электроизоляционных трубок обладают достаточной гибкостью.

§ 22. Пластические массы

Пластические массы (пластмассы) представляют собой изделия, получаемые из прессовочных порошков, которые под воздействием нагревания и давления размягчаются и приобретают свойства пластического течения. В результате этого могут быть получены литьем или прессованием пластмассовые изделия различной формы (корпуса и основания электроизмерительных приборов, электрических аппаратов, кнопки, ручки, крышки и т. д.).

Пластмассы, как правило, являются многокомпонентными материалами, состоящими из связующего вещества, наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, смазывающих ве-

ществ, отвердителей, красителей, порообразователей и других веществ *.

Связующие вещества – синтетические смолы (резольные, эпоксидные, кремнийорганические и др.) **. Они пропитывают наполнители и другие компоненты пластмасс, придают им пластичность и обеспечивают монолитность пластмассовым изделиям.

Связующими могут быть термопластичные или термореактивные вещества. В случае термопластичного связующего (поливинилхлорид и др.) пластмассовое изделие тоже будет термопластичным, т. е. при нагревании до определенной температуры начнет размягчаться. Термореактивные связующие (резольные, кремнийорганические и другие смолы) обеспечивают изделиям термореактивность – неразмягчаемость изделий при нагревании.

Наполнители – порошкообразные или волокнистые вещества, которые позволяют повысить механическую прочность и уменьшить объемную усадку изготовляемых пластмассовых изделий. Волокнистые наполнители (стеклянные, асбестовые и хлопковые волокна) повышают в значительной степени механическую прочность пластмасс. Неорганические наполнители (кварцевый и слюдяной порошки, стеклянное волокно) повышают коэффициент теплопроводности пластмасс и увеличивают их нагревостойкость. В пластмассах содержится 40 – 60 % наполнителей.

Пластификаторы представляют собой густые маслообразные синтетические жидкости, вводимые в пластмассы для понижения их хрупкости и повышения холодостойкости.

Стабилизаторы – вещества, вводимые в пластмассы с целью повышения их стойкости к свету и нагреву.

Смазывающие вещества (стеарин, олеиновая кислота) вводятся в пластмассы для лучшего отделения от поверхности стальной пресс-формы отпрессованного изделия.

Отвердители – вещества, вводимые в некоторые пластмассы с целью ускорения процессов их отвердевания. Основой этих процессов являются реакции полимеризации и поликонденсации.

Красители – вещества, придающие пластмассовым изделиям равномерную окраску. Красители вводят как для при-

---

* Отдельные виды пластмасс представляют собой чистые полимеры, например, поливинилхлорид, полиэтилены и др. Эти материалы называют ненаполненными пластмассами.

** В пластмассах неорганического состава (асбестоцемент, микалекс и др.) в качестве связующих применяют портландцемент, стекло и другие неорганические связующие.

дания декоративного вида, так и для повышения стойкости пластмассовых изделий к свету.

Порообразователи – вещества, которые при нагревании выделяют большое количество газов, создающих пористую структуру в газонаполненных пластмассовых изделиях. Выбирая состав и количество компонентов пластмассы, можно получить изделия с теми или иными механическими, тепловыми и диэлектрическими свойствами.

Исходными материалами, из которых изготовляют пластмассовые изделия, являются прессовочные порошки (пресс-порошки). Они представляют собой вещества, состоящие из связующего, наполнителей и других компонентов, входящих в состав пластмассы. Основной характеристикой пресс-порошков является текучесть, т. е. их способность растекаться под давлением в стальной пресс-форме. Чем больше текучесть пресс-порошка, тем более сложной формы можно получить пластмассовое изделие. Чем меньше текучесть пресс-порошка, тем больше должна быть величина удельного давления при прессовании пластмассовых изделий.

Прессование пластмассовых изделий производят в стальных пресс-формах (рис. 17). Пресс-формы для изделий малого габарита имеют несколько гнезд, что позволяет за одно прессование получить сразу несколько изделий. Дозировка и засыпка порошка в пресс-форму осуществляются автоматически. Иногда для удобства прессования из пресс-порошка вначале изготовляют заготовки – круглые таблетки, прессуемые при относительно небольших давлениях. Их затем подогревают и закладывают в стальные пресс-формы, в которых окончательно оформляют изделие прессованием.

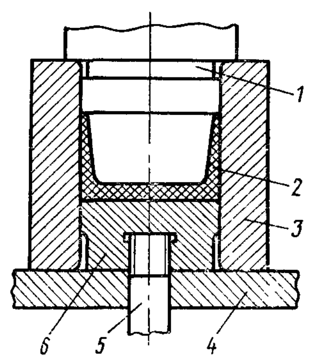


Рис. 17. Пресс-форма (разрез):

1 – пуансон, 2 – прессуемое изделие, 3 – матрица, 4 – плита, 5 – шток выталкивателя, 6 – выталкиватель

Большинство пластмассовых изделий электроизоляционного назначения получают методом горячего прессования в нагретых до 120–200 °С пресс-формах в зависимости от состава пресс-порошка. Некоторые пластмассовые изделия могут быть изготовлены холодным прессованием – при температуре порошка и пресс-формы 20 °С. Для обеспечения высокого уровня электроизоляционных и механических свойств изделия холод-

ного прессования должны затем подвергаться тепловой обработке – нагреванию в течение нескольких часов.

Минимальная толщина стенок пластмассовых изделий горячего прессования 1,5 мм, холодного прессования – 4–5 мм. Плотность пластмасс 900–2800 кг/м³. Нагревостойкость пластмасс широкого применения (фенопласты, аминопласты) 105–120 °С. Наиболее высокой нагревостойкостью (180–220 °С) обладают пластмассы на основе кремнийорганических связующих веществ и минеральных наполнителей (молотый кварц, стеклянное волокно). Пластмассы на основе кремнийорганических и эпоксидных связующих веществ отличаются стойкостью к грибковой плесени и влагостойкостью.

По сравнению с чистыми полимерами (полиэтилен, поливинилхлорид и др.) пластмассы на их основе обладают несколько пониженными электроизоляционными свойствами. Это вызвано введением в полимеры красителей, наполнителей и других веществ с целью повышения механической прочности и нагревостойкости пластмасс. Электрические характеристики пластмасс следующие: $\rho_v = 10^8 \div 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon = 5 \div 8$; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}002 \div 0{,}08$; $E_{пр} = 5 \div 25$ МВ/м. Лучшими характеристиками обладают пластмассы на основе кремнийорганических связующих.

§ 23. Слоистые пластмассы

Слоистые пластмассы представляют собой материалы со слоистой структурой. Эти пластмассы состоят из чередующихся слоев листового наполнителя (бумага, хлопчатобумажная или стеклянная ткань) и связующего вещества. Наиболее широко применяются гетинакс, текстолит и стеклотекстолит.

Гетинакс – листовой слоистый материал, в котором наполнителем являются листы пропитанной бумаги толщиной 0,10–0,12 мм. Процесс производства гетинакса заключается в пропитке бумаги бакелитовыми лаками и последующей разрезке ее на листы определенных размеров.

Листы пропитанной лаком бумаги после сушки собирают в пакеты определенной массы, соответственно толщине прессуемого изделия. Собранные пакеты прессуют между нагретыми (до 160 °С) стальными плитами гидравлических прессов. При горячем прессовании расплавленная смола склеивает пропитанные листы бумаги и переходит в неплавкое состояние. Давление прессования 5–9 МПа, время выдержки – от 2 до 5 мин на 1 мм толщины прессуемого листа. По окончании процесса прессования полученные доски и листы охлаждают. У вынутых из пресса листов и досок гетинакса края

обрезают пилой. Ширина листов 450–930; длина 700–1430 мм.

Гетинакс изготовляют в виде листов и досок толщиной от 0,2 до 50 мм марок I, II, III, IV, V – для работы в электрооборудовании промышленной частоты (50 Гц) и VI, VII и VIII – для работы на высокой частоте.

Гетинакс марок V-1 и V-2 отличается повышенной электрической прочностью, гетинакс марок III и IV имеет повышенную стойкость к влаге, а гетинакс марок I и II обладает повышенной механической прочностью.

Гетинакс используют для изготовления различного рода плоских электроизоляционных деталей и оснований. Следует учитывать, что дугостойкость гетинакса невысока и после нескольких искровых разрядов на его поверхности остается науглероженный след с большой проводимостью. Гетинакс легко поддается механической обработке – режется, пилится, сверлится, а тонколистовые его сорта хорошо штампуются в подогретом состоянии. Гетинакс может применяться при температурах не выше 105 °С (класс нагревостойкости А). Холодостойкость –65 °С.

Текстолит отличается от гетинакса тем, что наполнителем в нем является хлопчатобумажная ткань. Производство текстолита существенно не отличается от производства гетинакса. Текстолит выпускается марок А, Б и Г – на основе бязи и миткаля и марки ВЧ (для высоких частот) – на шифоне.

Электрические характеристики текстолита несколько ниже по сравнению с гетинаксом, однако у текстолита выше сопротивление раскалыванию (вдоль слоев) и ударная вязкость, доходящая до 20–30 кДж/м^2. Текстолит легче поддается механической обработке, но следует учитывать, что он значительно дороже гетинакса. Текстолит выпускается в листах толщиной от 0,5 до 50 мм и 0,5–8 мм (марка ВЧ). Ширина листов 450–980 мм и длина 600–1480 мм. Нагревостойкость текстолита 105 °С, холодостойкость –65 °С. Текстолит, как и гетинакс, обладает низкой дугостойкостью, так как его связующее – бакелитовая смола – легко науглероживается под действием электрических искр.

Стеклотекстолит отличается от текстолита тем, что наполнителем в нем является электроизоляционная бесщелочная стеклянная ткань. Он обладает повышенной влагостойкостью и нагревостойкостью и лучшими электрическими и механическими характеристиками по сравнению с текстолитом и гетинаксом, но хуже обрабатывается. Стеклотекстолит изготовляют нескольких марок: СТ – на основе бесщелочных тканей со связующим – фенолоформальдегидной смолой, СТЭФ и СТЭФ-1 – на смеси эпоксидной и кремнийорганической смол,

Таблица 8. **Основные характеристики слоистых пластмасс**

Характеристики	Гетинакс низкочастотный I, II, III и V	Текстолит низкочастотный А, Б, Г	Стеклотекстолит на основе связующей смолы		
			фенолоформальдегидной	кремнийорганической	эпоксидной и кремнийорганической
Плотность, кг/м^3	1350–1450	1300–1450	1600–1700	1700–1800	1800–1900
Разрушающее напряжение при изгибе, Н/м^2	$(1000 \div 1250)\cdot 10^5$	$(900 \div 1100)\cdot 10^5$	$(950 \div 1200)\cdot 10^5$	$(1500 \div 1700)\cdot 10^5$	$(2000 \div 4200)\cdot 10^5$
Разрушающее напряжение при растяжении, Н/м^2	$(800 \div 1000)\cdot 10^5$	$(560 \div 600)\cdot 10^5$	$(700 \div 900)\cdot 10^5$	$(900 \div 1200)\cdot 10^5$	$(1750 \div 2500)\cdot 10^5$
Ударная вязкость кДж/м^2	12–20	17–30	14–50	20–50	140–250
Теплостойкость (по Мартенсу), °С	150–160	135–150	185–200	250–260	185–200
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	10^8-10^9	10^7-10^9	10^9-10^{10}	$10^{11}-10^{12}$	$10^{11}-10^{12}$
Диэлектрическая проницаемость	6–8	6–7	5–7	5–6	6–7
Тангенс угла диэлектрических потерь (при 50 Гц)	0,04–0,08	0,08–0,18	0,07–0,09	0,006–0,012	0,008–0,014
Электрическая прочность,* МВ/м	12–20	5–10	12–20	18–30	15–25

* В направлении – *перпендикулярно* слоям; в направлении – *параллельно* слоям электрической прочности будут меньше указанных в таблице.

СТК — на кремнийорганическом связующем. Стеклотекстолит выпускают толщиной от 0,5 до 30 мм в листах шириной 450—980 мм и длиной 600—1480 мм. Основные характеристики слоистых пластмасс приведены в табл. 8.

Кроме описанных слоистых пластмасс в виде листов и досок изготовляют также слоистые намотанные электроизоляционные изделия в виде цилиндров, трубок, прессованных стержней и различных фасонных деталей.

Для этих изделий применяют бумагу, покрытую с одной стороны клеящим лаком, а также лакированные хлопчатобумажные и стеклянные ткани.

Намотанные изделия в виде цилиндров и трубок изготовляют намоткой лакированной бумаги или ткани на стальную оправку, диаметр которой соответствует внутреннему диаметру будущего изделия. Оправка лежит на двух нагреваемых валках и прижимается сверху третьим нагретым прижимным валком. Смола, находящаяся в лаковом слое бумаги или ткани, на нагретой стальной оправке плавится и склеивает листы между собой. Толщина изделий контролируется автоматическими приспособлениями.

Цилиндры и трубки, содержащие бумагу в качестве наполнителя, называются бумажно-бакелитизированными изделиями. Их выпускают диаметром от 10 до 1200 мм при толщине стенки от 1,5 до 8 мм и более. После намотки эти изделия подвергают тепловой обработке (выпекают) при температуре 130—200 °С в зависимости от состава связующего. Так как давление при намотке меньше давления, применяемого при запрессовке листовых материалов (гетинакс и др.), то цилиндры и трубки получаются менее плотными. Выпеченные цилиндры и трубки освобождают от оправок и обрезают с торцов. Места обреза лакируют, после чего изделия повторно запекают. Главная область применения бакелитизированных цилиндров и трубок — внутренняя изоляция в трансформаторах и электрических аппаратах. Механические и электрические характеристики намотанных изделий несколько ниже, чем у прессованных пластмасс: гетинакса, текстолита и стеклотекстолита.

§ 24. Слюдяные материалы

Слюда — природный минерал с характерным слоистым строением, позволяющим расщеплять кристаллы слюды на тонкие листочки толщиной до 0,006 мм. Тонкие листочки слюды обладают гибкостью, они упруги и имеют большое разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_р = (15 \div 35) \times$

$\times 10^5$ Н/м^2. Склеивая листочки слюды клеящими смолами или лаками (шеллачным, масляно-битумным и др.), получают твердую (миканиты) или гибкую (микаленты) слюдяную изоляцию для обмоток электрических машин.

Из довольно большой группы природных слюд в качестве электроизоляционных материалов применяют только мусковит и флогопит, так как они отличаются хорошей расщепляемостью и хорошими электрическими характеристиками.

Мусковит – калиевая слюда ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$). Цвет кристаллов мусковита преимущественно серебристый, иногда с зеленоватым или красноватым оттенком. Тонкие листочки (0,05 – 0,06 мм) этой слюды прозрачны. Мусковит обладает химической стойкостью: на него не действует ни один из растворителей и щелочей. Серная и соляная кислота разлагают мусковит только при нагревании.

Основные характеристики мусковита: плотность 2700 – 3000 кг/м^3, водопоглощение 1,3 – 4,5 %; $\rho_v = 10^{12} \div 10^{14}$ Ом·м; $\varepsilon = 6 \div 8$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}0003 \div 0{,}0005$; $E_{пр} = 120 \div 190$ МВ/м (при толщине листочков 0,01 мм). С увеличением толщины электрическая прочность слюды уменьшается.

Мусковит не изменяет своих свойств до температуры 500 °С. При превышении этой температуры из слюды начинает выделяться химически связанная вода. В результате этого листочки слюды вспучиваются, т. е. увеличивают свою толщину. При этом резко ухудшаются электрические и другие характеристики. Температура плавления мусковита равна 1260 – 1300 °С.

Флогопит – калиевомагнезиальная слюда ($K_2O \cdot 6MgO \times$ $\times Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$). Цвет кристаллов флогопита изменяется от черного до янтарного. Тонкие (0,006 – 0,01 мм) листочки слюды флогопита полупрозрачны. Они имеют меньшее разрушающее напряжение при растяжении и менее упруги по сравнению со слюдой мусковит. Сравнительно низкое сопротивление истиранию позволило применять флогопит в производстве клееных листовых материалов – коллекторных миканитов. Из них штампуют прокладки для изоляции медных пластин в коллекторах электрических машин. Находясь во время работы под истирающим действием щеток, изоляционные прокладки из флогопита истираются в одинаковой степени с медными пластинами. Это обеспечивает нормальную работу коллектора.

Флогопит обладает меньшей химической стойкостью по сравнению с мусковитом. Он реагирует с кислотами, но щелочи на него не действуют.

Основные характеристики флогопита: плотность 2700 –

2800 кг/см^3; водопоглощение 1,5 – 5,2 %; $\rho_v = 10^{11} \div 10^{13}$ Ом · м; $\varepsilon = 5 \div 7$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}002 \div 0{,}008$; $E_{пр} = 95 \div 180$ МВ/м (при толщине листочков 0,01 мм).

Флогопит не изменяет своих характеристик до температуры 800 °С. При превышении этой температуры начинается вспучивание листочков флогопита с потерей ими первоначальных электрических и механических свойств. У некоторых разновидностей слюды флогопит с повышенным содержанием воды (гидратизированный флогопит) резкое ухудшение свойств наступает, начиная с температуры 200 – 250 °С. Температура плавления слюды флогопит равна 1270 – 1330 °С.

Следует отметить, что все виды слюды поглощают влагу, главным образом по плоскостям спайности листочков слюды. Водопоглощение слюды составляет 1,3 – 5,5 %. Слюда залегает в земле вместе с другими минералами (пегматит, кварц и др.). Добытые кристаллы слюды подвергают очистке, а затем раскалывают на пластины, называемые слюдяными подборами. Разделением слюдяных пластин – подборов получают щепаную слюду. Это листочки слюды толщиной 10 – 45 мкм, имеющие форму контура, соответствующую контуру подбора. Щепаную слюду получают методом расщепления соответствующих подборов слюды – мусковит и флогопит. Этим методом можно получать листочки, однородные по толщине. В зависимости от площади прямоугольника, который можно вписать в контур листочка, различают девять размеров щепаной слюды (табл. 9).

Таблица 9. **Сортамент щепаной слюды**

Номер щепаной слюды	50	40	30	20	15	10	6	4	0,5
Площадь вписываемого прямоугольника, см^2	50 – 60	40 – 50	30 – 40	20 – 30	15 – 20	10 – 15	6 – 10	4 – 6	0,5 – 4

Щепаную слюду применяют для изготовления ответственных видов изоляции (пазовая и др.) в турбогенераторах, гидрогенераторах, тяговых электродвигателях и в других электрических машинах. Из-за малой площади листочков щепаной слюды ее применяют в виде клееных слюдяных материалов – миканитов и микалент.

Создана синтетическая слюда – **фторфлогопит**, обладающая хорошей расщепляемостью на листочки, которые совершенно

прозрачны. По сравнению с природными слюдами фторфлогопит обладает более высокой нагревостойкостью (до 1000 °C), меньшим водопоглощением (0,5–2,0%) и более высоким уровнем электрических характеристик. Так, у синтетической слюды удельное объемное сопротивление в 15–20 раз, электрическая прочность в 1,5 раза выше, а тангенс угла диэлектрических потерь в 2 раза меньше, чем у природной слюды. Главные области применения фторфлогопита – внутренняя изоляция в электронных лампах и нагревостойкая изоляция специальных электрических машин.

Миканиты – твердые или гибкие листовые материалы, получаемые склеиванием листочков щепаной слюды с помощью клеящих смол (шеллачной, глифталевой и др.) или лаков на основе этих смол. Для этого листочки природной щепаной слюды раскладывают на столах в один слой, сбрызгивают клеящим лаком, накладывают второй слой и тоже сбрызгивают лаком и так далее, пока не будет набран лист требуемой толщины. Полученный лист подвергают горячему прессованию.

В настоящее время процесс производства листовых заготовок миканитов механизирован. Все миканиты обозначают соответствующими марками, состоящими из двух или трех букв, а иногда и цифр. Первая буква в обозначении марки указывает тип миканита (К – коллекторный, П – прокладочный, Ф – формовочный, Г – гибкий), вторая буква обозначает вид примененной слюды (М – мусковит, Ф – флогопит, С – смесь мусковита и флогопита), третья буква, стоящая в обозначении марки миканитов, указывает на тип связующего (Г – глифталевая смола, Ш – шеллачная смола, К – кремнийорганическая смола, П – полиэфирная смола). Буква А, стоящая в конце марки, указывает на пониженное содержание связующего.

Например, марка ПМГА показывает, что это прокладочный миканит, изготовленный на слюде мусковит и глифталевой смоле с пониженным содержанием связующего (5–12%). Прокладочный миканит марки ПМГ, изготовленный тоже на слюде мусковит, содержит 15–20% связующего (глифталевой смолы).

Коллекторный миканит представляет собой листовой твердый материал, изготовленный склеиванием листочков щепаной слюды флогопит шеллачной или глифталевой смолами и двухкратным горячим прессованием при давлении (180–260)$\cdot 10^5$ Н/м^2 при температуре 155 °C. Отпрессованные листы коллекторного миканита подвергают шлифованию, чтобы отклонения по толщине листов не превосходили $\pm 0{,}06$ мм.

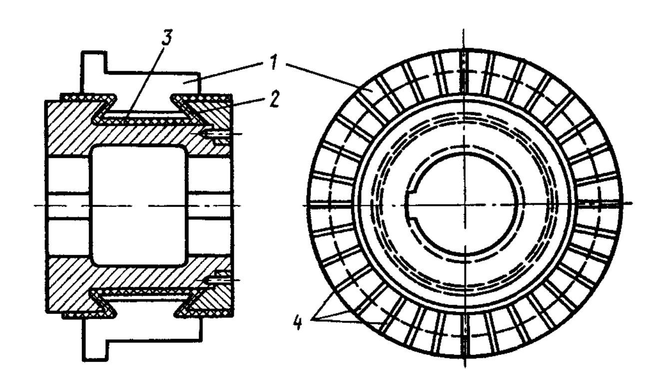


Рис. 18. Изделия из миканитов в коллекторе электрической машины:

1 — коллекторные медные пластины, *2* — манжета из формовочного миканита, *3* — цилиндр из формовочного миканита, *4* — прокладки из коллекторного миканита

Затем листы миканита покрывают лаком и снова подвергают прессованию, чтобы материал имел плотную структуру, обеспечивающую надежную работу коллекторов электрических машин. Чтобы избежать скольжения листочков слюды, в коллекторные миканиты вводят не более 4—6% связующего вещества. Коллекторный миканит выпускают в листах толщиной 0,4—1,5 мм и площадью 215 × 465 мм (не менее).

Электрические характеристики коллекторного миканита: $\rho_v = 10^{11} \div 10^{13}$ Ом·м; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}01 \div 0{,}03$; $E_{пр} = 18 \div 25$ МВ/м.

Из листочков коллекторного миканита штамповкой получают изоляционные прокладки (рис. 18), применяемые для изоляции друг от друга медных пластин в коллекторах электрических машин.

Прокладочный миканит представляет собой листовой твердый материал, изготовленный склеиванием листочков щепаной слюды мусковит, флогопит или смеси их с последующим прессованием. В качестве связующих веществ применяют шеллачную, глифталевую или кремнийорганическую смолу. В прокладочных миканитах слюда составляет 80—95%, а количество связующего соответственно 20—5%.

Прокладочный миканит изготовляют однократным прессованием при температуре 150 °С и давлении $(35 \div 60) \times 10^5$ Н/м^2. Выпускают миканит в листах толщиной 0,15—5,0 мм и площадью не менее 550 × 650 мм.

Электрические характеристики прокладочного миканита: $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом·м; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}03 \div 0{,}06$; $E_{пр} = 15 \div 20$ МВ/м.

Из прокладочного миканита изготовляют различные элек-

троизоляционные прокладки для электрических машин и аппаратов.

Формовочный миканит – листовой материал, получаемый склеиванием листочков щепаной слюды мусковит, флогопит или их смеси глифталевой, шеллачной или кремнийорганической смолой. Заготовки формовочного миканита подвергают однократному прессованию при давлении $(5 \div 10) \cdot 10^5$ Н/м^2 и температуре 155 °С. По сравнению с коллекторным и прокладочным формовочный миканит имеет несколько рыхлую структуру. Это необходимо для изготовления (горячим прессованием) из формовочного миканита электроизоляционных изделий сложной формы (см. рис. 18). В формовочных миканитах слюды 80–95 %, связующего вещества от 20 до 5 %.

Твердый при комнатной температуре формовочный миканит обладает способностью формоваться в нагретом состоянии и сохранять приданную ему форму. Формовочный миканит выпускают в листах толщиной от 0,1 до 2,0 мм и более и площадью (не менее) 550 × 650 мм.

Электрические характеристики формовочного миканита: $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом · м; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}05 \div 0{,}09$; $E_{пр} = 12 \div 18$ МВ/м. Более высокие значения электрических характеристик относятся к миканитам толщиной 0,15–0,25 мм, изготовленным на слюде мусковит.

Гибкий миканит – листовой материал, получаемый склеиванием щепаной слюды (мусковит или флогопит) с помощью масляноглифталевых лаков, образующих гибкие пленки. Гибкие миканиты выпускают прессованными и непрессованными.

Для повышения механической прочности некоторые виды гибкого миканита оклеивают с двух сторон микалентной бумагой. Толщина листов миканита от 0,15 до 0,5 мм.

В гибких миканитах, не оклеенных бумагой, слюда составляет 75–90 %, остальное – связующее; в миканитах, оклеенных бумагой, слюда составляет 50–65 %, связующее – 25–10 %, остальное – бумага.

Гибкие миканиты применяют в качестве пазовой, межвитковой и подбандажной изоляции в электрических машинах, а также в качестве различных гибких электроизоляционных прокладок. Способность изгибаться (при 20 °С) у гибких миканитов должна сохраняться в течение 60 суток со дня отправки миканита заводом-изготовителем.

Гибкий стекломиканит отличается от гибкого миканита тем, что он оклеен с одной или двух сторон бесщелочной стеклотканью, которая значительно повышает механическую прочность и гибкость материала. Нагревостойкий гибкий стекломиканит (класс Н) изготовляют на кремнийорганическом

связующем. Остальные стекломиканиты клеят на масляно-глифталевых или на эпоксиднополиэфирных лаках. В стекломиканитах применяется слюда флогопит.

Гибкие стекломиканиты содержат слюды 45—65 %, клеящих веществ — 30—8 %, остальное — стеклоткань. Эти миканиты имеют толщину 0,20—0,60 мм.

Электрические характеристики гибких миканитов: $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом·м; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}05 \div 0{,}09$; $E_{пр} = 12 \div 28$ МВ/м.

Все виды миканитов на кремнийорганическом связующем могут длительно работать при 180 °С (класс Н), миканиты на полиэфирных и эпоксидных клеящих составах могут длительно работать при 155 °С, а миканиты на шеллачных и глифталевых смолах — при температурах не выше 130 °С.

Микафолий — рулонный или листовой материал, состоящий из одного или нескольких слоев щепаной слюды (мусковит или флогопит), наклеенных на плотную телефонную бумагу толщиной 0,05 мм. В качестве связующего применяют глифталевый, масляно-глифталевый и другие лаки.

Микафолий выпускают в рулонах шириной не менее 500 мм и в листах размером 500 × 1000 мм и толщиной 0,15; 0,20; 0,30 мм. В микафолии содержится (по массе) 45—65 % слюды, 30—12 % клеящих веществ, остальное бумага и летучие вещества. Микафолий, как и формовочный миканит, обладает способностью формоваться в нагретом состоянии. Из микафолия изготовляют (горячим прессованием) трубки для изоляции болтов и шпилек, гильзы для пазовой изоляции обмоток и другие фасонные изделия.

Все виды микафолия по нагревостойкости относятся к классу В, т. е. могут работать при температурах до 130 °С.

Основные характеристики микафолия: $\sigma_р = (1{,}5 \div 3{,}2) \times 10^5$ Н/м^2; $\rho_v = 10^{10} \div 10^{11}$ Ом·м; $E_{пр} = 13 \div 20$ МВ/м.

Микалента — рулонный материал, обладающий гибкостью при комнатной температуре. Микаленту получают наклеиванием в один слой листочков щепаной слюды (с перекрытием) на тонкую (0,02—0,03 мм) микалентную бумагу или стеклянную ткань. Получаемый материал имеет толщину 0,08 мм. Микалента толщиной 0,10; 0,13; 0,17 и 0,21 мм оклеивается микалентной бумагой или стеклотканью с двух сторон. В качестве лаков применяют масляно-битумные (черные) или масляно-глифталевые (светлые), а в производстве стекломикаленты — нагревостойкие кремнийорганические лаки.

В микаленте содержится (по массе): 45—60 % слюды; 25—20 % бумаги; 20—15 % клеящего вещества; остальное — летучие вещества.

Микалента выпускается в рулонах шириной 400 мм и в ро-

ликах шириной 10, 15, 20, 23, 25, 30 и 35 мм. Для сохранения гибкости микаленту поставляют и хранят в герметически закрытой таре (металлических коробках).

Микалента применяется в качестве основной изоляции обмоток (стержней) в генераторах и электродвигателях высокого напряжения. Наибольшей нагревостойкостью обладают микаленты на кремнийорганическом связующем с подложкой из стеклянной ткани.

Электрические характеристики микаленты: $\sigma_р = (1,8 \div 3,5) \times 10^5$ Н/м^2; $\rho_v = 10^{10} \div 10^{12}$ Ом·м; $E_{пр} = 10 \div 22$ МВ/м.

§ 25. Слюдинитовые и слюдопластовые материалы

При разработке природной слюды и изготовлении из нее электроизоляционных материалов образуется около 90% различных отходов. Среди них большой процент составляют мелкие отходы слюды – скрап. Из очищенного скрапа изготовляют слюдяную (слюдинитовую) бумагу, из которой получают твердые или гибкие электроизоляционные материалы – слюдиниты. Для изготовления слюдинитовой бумаги применяют отходы слюды мусковит.

Для улучшения электрических и механических свойств слюдинитовых бумаг в слюдяную пульпу вводят различные связующие (кремнийорганические, глифталевые и другие смолы).

Из слюдинитовой бумаги изготовляют те же электроизоляционные материалы, что и из щепаной слюды. Однако слюдинитовые материалы обладают большей равномерностью по толщине, большей однородностью и несколько повышенными электрическими характеристиками. В качестве недостатков слюдинитовых материалов необходимо отметить меньшую механическую прочность и несколько пониженную влагостойкость по сравнению с миканитами.

Из слюдинитовых материалов наибольшее применение получили слюдинитовая и стеклослюдинитовая ленты, отличающиеся большей однородностью свойств по сравнению с микалентой. Повышенной нагревостойкостью обладают стеклослюдинитовые ленты на кремнийорганическом связующем. Кроме того, применение находят коллекторный, прокладочный и гибкий слюдиниты. Электрические характеристики слюдинитовых материалов находятся на том же уровне, что и у соответствующих им материалов из щепаной слюды. Стеклослюдинитовые ленты применяют для витковой и корпусной

изоляции в электрических машинах вместо микаленты. По нагревостойкости слюдинитовые материалы относятся к классам В, F и Н в зависимости от применяемого связующего.

Первая попытка в использовании отходов слюды привела к созданию твердых листовых материалов и гибких лент на основе слюдинитовых бумаг – слюдинитовых электроизоляционных материалов. Они заменили клееные материалы из щепаной слюды. Но слюдинитовая бумага, являющаяся основой всех слюдинитовых материалов, обладает малой механической прочностью. Поиски более прочной основы для новых электроизоляционных материалов из отходов слюды привели к разработке слюдопластовых бумаг. Последние обладают более высокой механической прочностью по сравнению со слюдинитовыми бумагами.

Слюдопластовую бумагу получают тоже посредством измельчения отходов слюды, но без применения высокотемпературной (800 °С) и химической обработки отходов слюды, применяемых в производстве слюдинитовой бумаги. Это позволяет в большей степени сохранить частичкам слюды способность сцепляться друг с другом. При этом образуется слюдопластовая бумага со значительно большей механической прочностью по сравнению с бумагой слюдинитовой.

Слюдопластовые бумаги, как и слюдинитовые, обладают пористостью, и поэтому изоляция, выполненная из этих материалов, применяется после пропитки ее электроизоляционными лаками или компаундами. Наиболее перспективными пропиточными и связующими веществами являются кремнийорганические лаки, поскольку они обеспечивают получение нагревостойких электроизоляционных материалов (ленты и др.).

Применение пропиточных и связующих составов и подложек в виде стеклянной ткани позволяет получить тот же ассортимент электроизоляционных материалов, что и из щепаной слюды. Это коллекторный, прокладочный, формовочный и гибкий слюдопласты, а также слюдопластофолий, стеклослюдопластовая лента и другие композиционные материалы на основе слюдопластовой бумаги. Опыт применения материалов в качестве витковой, межвитковой и пазовой изоляции электрических машин показал, что слюдинитовые и слюдопластовые материалы имеют более равномерную толщину и бóльшие значения электрической прочности по сравнению с многими клееными материалами из щепаной слюды. Широкое внедрение слюдинитовых и слюдопластовых материалов в электротехническое производство имеет большое технико-экономическое значение.

§ 26. Электрокерамические материалы

Электрокерамические материалы представляют собой твердые камнеподобные вещества, которые можно обрабатывать только абразивами (карборунд и др.). Все электрокерамические материалы по назначению делят на три группы: изоляторная, конденсаторная и сегнетоэлектрическая керамика*. Все электрокерамические материалы негигроскопичны и атмосферостойки. Одним из широко применяемых электрокерамических материалов является **электротехнический фарфор****. Из него изготовляют различные конструкции изоляторов высокого и низкого напряжения (рис. 19).

Исходная электрофарфоровая масса состоит из глинистых веществ (42–50 %), кварца (20–25 %), калиевого полевого шпата (22–30 %) и измельченных бракованных фарфоровых изделий (5–8 %). Для изготовления изоляторов из тестообразной массы в измельченные компоненты вводят 20–22 % воды. После этого тестообразную фарфоровую массу подвергают вакуумной обработке с целью извлечения из нее воздушных включений.

Масса, полученная из вакуум-пресса, представляет собой монолитный цилиндр, который по выходе из мундштука разрезается на куски заданной длины (заготовки), из которых изготовляют (оформляют) различные типы изоляторов.

Изоляторы формуют прессованием заготовок в гипсовых или стальных формах и другими методами. Извлеченные из форм изоляторы поступают на токарные станки, где им придают окончательные очертания и размеры. Обточенные изоляторы имеют влажность 16–18 %. Далее их направляют в сушилки, где влажность снижается до 0,1–2 %. В связи с удалением воды из изделий происходит воздушная усадка – уменьшение объема изделий.

Высушенные фарфоровые изделия покрывают жидкой глазурной суспензией (глазурью). Состав глазури отличается от состава жидкой фарфоровой массы бóльшим содержанием стеклообразующих компонентов (кварц, полевой шпат, доломит и др.). В цветные глазури вводят еще красители – хромистый железняк, пиролюзит и др.

В процессе обжига электрофарфоровых изделий слой глазури плавится, создавая на поверхности изделий ровное стекло-

---

* Сегнетоэлектрические свойства впервые были обнаружены у сегнетовой соли. Отсюда происходит название – сегнетоэлектрики.

** Разработка и создание отечественного фарфора (в 1746 г.) принадлежит Д. И. Виноградову.

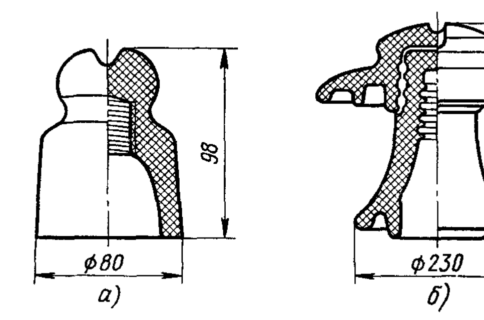


Рис. 19. Штыревые фарфоровые изоляторы:
а – низкого напряжения, *б* – высокого напряжения

видное покрытие. Глазурь повышает механическую прочность изоляторов и делает их стойкими к влаге и атмосферным загрязнениям. Цветные глазури служат также для маскировки изоляторов.

Термическую обработку – обжиг изоляторов производят в туннельных печах непрерывного действия. Эти печи отличаются высокой производительностью, так как обжиг изоляторов в этих печах происходит непрерывным потоком. Высушенные и покрытые глазурной суспензией изоляторы, установленные на специальных вагонетках, перемещаются в туннеле печи. Они последовательно проходят зоны подогрева, обжига и охлаждения в печи с заданными температурами. При выходе из печи они представляют собой готовые электрокерамические изделия. При обжиге электрокерамических изделий пламя и газы не должны непосредственно действовать на них, поэтому изоляторы и другие изделия помещают в огнеупорные капсели, которые представляют собой круглые коробки, изготовленные из огнеупорной керамической массы.

Полученные после обжига электрокерамические изделия подвергают механическим и электрическим испытаниям. При этом дефектные изделия отбраковывают.

Если рассматривать структуру фарфора под микроскопом, то видно, что фарфор состоит из иглообразных кристаллов муллита $2SiO_2 \cdot 3Al_2O_3$, хаотически расположенных по отношению друг к другу. Промежутки между этими кристаллами заполнены стеклом, в котором частично растворились зерна кварца. Сочетание кристаллической и стекловидной фазы обеспечивает достаточно высокую механическую и электрическую прочность фарфора и отсутствие гигроскопичности. Основные характеристики электрофарфора приведены в табл. 10.

Другим электрокерамическим материалом является **стеатит.**

Таблица 10. **Основные характеристики электрокерамических материалов (неглазурованные образцы)***

Материал	Плотность, кг/м³	Разрушающее напряжение при растяжении, Н/м²	Разрушающее напряжение при изгибе, Н/м²	Ударная вязкость, кДж/м²	Удельное объемное сопротивление, Ом·м	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь (при 50 Гц)	Электрическая прочность, МВ/м
Электрофарфор	2300–2500	$(300 \div 500) \cdot 10^5$	$(600 \div 1000) \cdot 10^5$	1,8–2	10^{11}–10^{12}	6–7	0,025–0,030	30–32
Стеатит	2800–3000	$(500 \div 700) \cdot 10^5$	$(1400 \div 1700) \cdot 10^5$	3–4	10^{13}–10^{14}	7–8	0,0006–0,004	35–40

* У глазурованных образцов механические характеристики выше в среднем на 15–20 %.

Он отличается от электрофарфора повышенной механической прочностью и лучшими электрическими характеристиками. Стеатитовые электроизоляционные изделия могут работать при температурах до 250 °С, существенно не изменяя своих электрических характеристик. У изделий же из электротехнического фарфора наблюдается резкое ухудшение электрических характеристик, начиная от температуры 100 °С и выше.

Стеатит – материал более дорогой по сравнению с электрофарфором, так как для его изготовления используется более дорогое сырье.

Исходные стеатитовые массы изготовляют на основе природного минерала – талька ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) и углекислого бария $BaCO_3$ или углекислого кальция $CaCO_3$. Для обеспечения пластичности в стеатитовые массы вводят 15–20 % глинистых веществ (бентонитовые и другие глины). Для стеатитов применяют наиболее чистые сорта природного талькового камня с содержанием окислов железа не более 0,5 %. Процесс приготовления исходных стеатитовых пластических масс не отличается от приготовления электрофарфоровых масс.

Из пластичной стеатитовой массы изготовляют стеатитовые изоляторы и электроизоляционные изделия методом прессования в гипсовых формах.

Наиболее широко распространен способ литья стеатитовых изделий под давлением на парафиновом связующем (парафиновая связка). По этой технологии вначале получают так называемый стеатитовый спек. Это частицы стеатитовой массы, прошедшие предварительный обжиг в печи, которые затем измельчают. Очищенный порошок помещают в шаровую мельницу с электрическим обогревом. В нее же загружают парафин (8 – 16 %), олеиновую кислоту (0,6 – 0,8 %) и мелящие тела (стеатитовые шары). Мельницу нагревают до 90 °С и, закрыв люк, пускают ее. При этом происходит тонкий помол стеатитового порошка и смешение его с расплавленным парафином. Обычно в этой же шаровой мельнице литейная стеатитовая масса подвергается вакуумированию с целью улучшения литейных качеств массы. Приготовленная литейная масса поступает в рабочие баки литейных аппаратов. Оттуда под давлением $(3-8)\cdot 10^5$ Па она заполняет стальные формы.

Методом литья под давлением изготовляют изделия сложного профиля (рис. 20) для электрических аппаратов и приборов.

Для удаления из отлитых изделий парафина их помещают в огнеупорные коробки – капсели. Пространство между отлитыми изделиями в капселях заполняют порошком глинозема. Капсели с изделиями плавно нагревают до 800 °С и выдерживают при этой температуре. Парафин удаляется из отлитых изделий и впитывается порошком глинозема. После удаления парафина изделия подвергают обжигу в печах при конечной температуре 1280 – 1350 °С.

Стеатитовые изделия, полученные методом горячего литья под давлением, имеют плотную и гладкую поверхность. Наименьшей объемной усадкой (5 %) обладают изделия, изготовляемые из литейной массы, в которую предварительно вводят обожженные минералы, составляющие исходную стеатитовую массу (стеатитовый спек). Основу стеатита составляют кристаллы клиноэнстатита ($MgO\cdot SiO_2$). Их содержится в стеатите около 70 %, а остальные 30 % составляют стекло.

В табл. 10 приведены основные характеристики электрофарфора и стеатита*.

Керамические конденсаторные материалы отличаются от изоляторных керамических материалов большей величиной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 14 \div 250$). Это позволяет изготовлять керамические конденсаторы большой емкости и сравнительно малых габаритов. Керамические конденсаторы

---

* О типах, размерах и характеристиках изоляторов см.: Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М., Высшая школа, 1982.

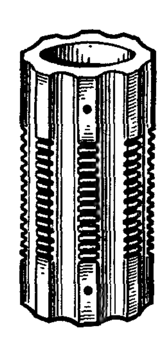


Рис. 20. Каркас катушки трансформатора, полученный литьем из стеатитовой литейиой массы

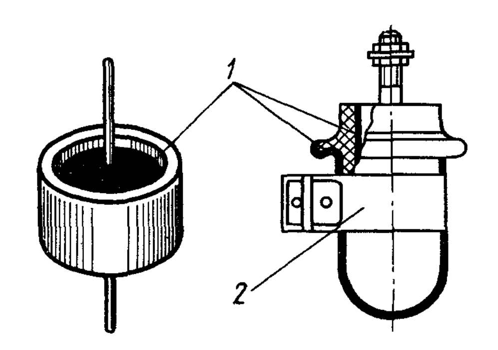


Рис. 21. Бочоночный и горшковый керамические конденсаторы:
1 – электроды, 2 – латунная обойма

не обладают гигроскопичностью и поэтому ие нуждаются в защитных корпусах и оболочках, которые необходимы для бумажных и слюдяных конденсаторов. Технология производства керамических конденсаторов значительно проще по сравнению с производством бумажных и слюдяных конденсаторов.

Керамические конденсаторы (рис. 21) изготовляют методами керамической технологии: литьем в гипсовые или стальные формы, прессованием и др. Изготовленные тем или иным способом конденсаторы подвергают обжигу в печах при конечных температурах 1450 – 1700 °С. В результате этого получают неувлажняемые, механически прочные конденсаторы. На поверхность керамических конденсаторов наносят (методом вжигания) сплошные серебряные электроды *1* толщиной 15 – 20 мкм, к которым припаивают медные проводники. Для защиты электродов от коррозии и исключения возможности замыкания всю поверхность керамических конденсаторов покрывают сплошным слоем влагостойкой эмали.

Кондеисаторные керамические материалы должны обладать большими значениями диэлектрической проницаемости. Для этого в них должны интенсивно протекать процессы поляризации. Наряду с этим конденсаторные материалы должны иметь высокий уровень остальных электрических характеристик: $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом · м; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0005$; $E_{пр} = 20 \div 25$ МВ/м. Этому требованию удовлетворяют материалы на основе соединений диоксида титана TiO_2, диоксида олова SnO_2 или диоксида

циркония ZrO_2, с одной стороны, и оксидов щелочных или щелочноземельных металлов (CaO; MgO; SrO и др.) – с другой. Для получения конденсаторных материалов эти порошкообразные окислы смешивают друг с другом в определенном соотношении и тщательно измельчают. Для придания пластичности в некоторые исходные конденсаторные массы вводят небольшое количество глинистых веществ. Однако это вызывает ухудшение электрических характеристик керамических конденсаторов.

Керамические конденсаторные материалы на основе диоксида титана называются **титанатами**, например титанат магния $MgTiO_3$. Керамические материалы на основе диоксида олова называются **станнатами**, например станнат кальция $CaSnO_3$. Керамические материалы на основе диоксида циркония называются **цирконатами**, например цирконат бария BaZ_TO_3 и др.

Значения диэлектрической проницаемости, а также величина и знак температурного коэффициента диэлектрической проницаемости определяются составом и структурой материала.

Основные характеристики некоторых керамических конденсаторных материалов даны в табл. 11.

Таблица 11. **Основные характеристики конденсаторных керамических материалов***

Кристаллическая основа керамики	Химическая формула кристаллической основы	Диэлектрическая проницаемость	Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, 1/°C	Разрушающее напряжение при статическом изгибе, Н/м²
Титанат магния	$MgTiO_3$	14	$+70 \cdot 10^{-6}$	$1200 \cdot 10^5$
Титанат кальция	$CaTiO_3$	150	$-1500 \cdot 10^{-6}$	$1500 \cdot 10^5$
Станнат кальция	$CaSnO_3$	16	$+110 \cdot 10^{-6}$	$900 \cdot 10^5$
Циркоиат бария	$BaZrO_3$	38	$-350 \cdot 10^{-6}$	$800 \cdot 10^5$

* Плотность конденсаторных керамических материалов находится в пределах $3200 \div 4800$ кг/м³.

Сегнетокерамические материалы (сегнетокерамика) относятся к группе диэлектриков, называемых **сегнетоэлектриками**. В отличие от ранее рассмотренных диэлектрических материалов сегнетоэлектрики обладают некоторыми характерными свойствами. Так, у сегнетоэлектриков наблюдаются аномально

большие значения диэлектрической проницаемости, что позволяет применять их в качестве датчиков температуры при измерении ее электрическими методами. Большая диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков позволяет изготовлять из них миниатюрные электрические конденсаторы большой емкости. Значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков в сильной степени возрастают с повышением приложенного к ним напряжения, чего не наблюдается у обычных диэлектриков. Это характерное свойство сегнетоэлектриков используется в диэлектрических усилителях.

Если пластинку сегнетоэлектрика сжимать или растягивать, прикладывая к ее сторонам механические усилия, то на противоположных поверхностях пластинки наводятся электрические заряды разного знака. В результате этого пластинка сегнетоэлектрика становится источником эдс. Это явление называется «прямым пьезоэффектом». Он позволяет применять сегнетоэлектрики в электрических датчиках для измерения давления.

Если же к пластине сегнетоэлектрика приложить переменное напряжение, то пластинка начнет вибрировать с той частотой, с какой изменяется приложенное к ней переменное напряжение. Это явление называют «обратным пьезоэффектом». Изготовляемые из сегнетоэлектриков пьезоэлементы служат источником высокочастотных колебаний.

До недавнего времени единственным сегнетоэлектриком была сегнетова соль ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$). Это – кристаллическое вещество, растворимое в воде и плавящееся при 55 °C, что затрудняло его использование.

В 1943 г. был синтезирован первый керамический сегнетоэлектрик – титанат бария ($BaTiO_3$) *. В настоящее время создано большое количество керамических сегнетоэлектриков: титанат кадмия ($CdTiO_3$), цирконат свинца ($PbZrO_3$) и др. Керамические сегнетоэлектрики не поглощают влагу, не растворяются в воде и могут работать в достаточно широком интервале температур.

Все сегнетоэлектрики обладают характерными сегнетоэлектрическими свойствами только до определенной температуры. Так, титанат бария обладает сегнетоэлектрическими свойствами до температуры 120 °C, а цирконат свинца – до 461 °C. При превышении этих температур ** сегнетоэлектрики

---

* Открытие и исследование сегнетоэлектрических свойств титаната бария принадлежит советскому ученому – академику Б. М. Вулу.

** Эти предельные температуры называются сегнетоэлектрическими температурами Кюри.

теряют свои характерные свойства и становятся обычными диэлектриками.

§ 27. Силикатные [неорганические] стекла

Неорганическое стекло является дешевым материалом, так как его изготовляют из очень доступных веществ: кварцевого песка SiO_2, соды Na_2CO_3, доломита $CaCO_3 \times \times MgCO_3$, мела $CaCO_3$ и некоторых других компонентов. Смесь этих веществ, взятых в определенном соотношении, называется *шихтой*. Шихта загружается в стекловаренную печь и при нагревании до 1350—1600 °С плавится, образуя жидкую стекломассу, из которой изготовляют различные стеклянные изделия.

Главным стеклообразующим веществом является кварцевый песок, который содержит 98% SiO_2. Практически стекло можно получать из одного кварцевого песка, однако расплавить его можно только при очень высокой температуре (около 2000 °С). Для этого нужно иметь дорогостоящие печи и другое сложное оборудование. Правда, чистые кварцевые стекла обладают рядом ценных свойств: очень высокими электрическими характеристиками, стойкостью к влаге (гидролитическая стойкость) и имеют очень малый температурный коэффициент линейного расширения ($5 \cdot 10^{-7}$ 1/°С). Это обусловливает исключительно высокую термостойкость кварцевого стекла. Так, изделия из кварцевого стекла, нагретые до красного каления и погруженные в холодную воду, не растрескиваются.

Некоторые термостойкие электроизоляционные изделия (небольшие изоляторы) изготовляют из чистого кварцевого стекла.

Основные характеристики кварцевого стекла: плотность 2200 кг/м^3; $\rho_v = 10^{14}$ Ом·м; $\varepsilon = 3{,}8$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0001$; $E_{пр} = 35 \div 44$ МВ/м.

Для получения же остальных видов стекла составляют шихту, в которой, кроме кварцевого песка, содержатся вещества, снижающие температуру его плавления. К этим веществам относятся: кальцинированная сода, мел, доломит и некоторые другие.

В состав шихты вводят также вещества, предотвращающие кристаллизацию стекол, — глинозем Al_3O_3, борный ангидрид B_2O_3 и др.

При нагревании шихты из нее вначале испаряется влага. Газы улетучиваются в атмосферу, а оставшиеся окислы натрия, калия, кальция и др. вступают в химические реакции

с кремнеземом (SiO_3) и образуют сложные соединения, называемые *силикатами*. Отсюда неорганические стекла называются силикатными.

При температуре 1350 – 1600 °С силикаты плавятся, образуя вязкую стекломассу, из которой изготовляют различные стеклянные изделия. Так, посредством выдувания в металлические формы получают ламповые баллоны, а посредством прессования стеклянные изоляторы и другие изделия.

По своему химическому составу все силикатные стекла можно разделить на четыре группы: щелочные, щелочные с содержанием тяжелых окислов, малощелочные, бесщелочные.

Щелочные стекла сравнительно легкоплавкие (1350 °С), содержат большое количество щелочных оксидов преимущественно Na_2O и частично K_2O. К этой группе стекол принадлежат оконное, посудное и бутылочное. Щелочные стекла обладают низкими значениями электрических характеристик и имеют большой температурный коэффициент линейного расширения, что обусловливает их низкую термостойкость.

Щелочные стекла с содержанием тяжелых окислов обладают повышенными значениями электрических характеристик. К этой группе относятся флинты (содержат PbO) и кроны (содержат BaO). Их применяют для изготовления электроизоляционных изделий (конденсаторы, изоляторы и др.).

Малощелочные стекла содержат щелочных оксидов не более 5%. Из этих стекол изготовляют стеклянные изоляторы высокого напряжения.

Бесщелочные стекла либо совершенно не содержат щелочных оксидов (как, например, кварцевое стекло), либо содержат их не более 2%. Из них изготовляют стеклянное волокно для электроизоляционных стеклотканей. Эти стекла отличаются сравнительно высокой температурой плавления. Для понижения ее в состав шихты вводят борный ангидрид (до 10%).

До последнего времени все изоляторы изготовляли из электротехнического фарфора. Попытки применить для этой цели стекло оканчивались неудачей из-за недостаточной механической прочности и термической стойкости стеклянных изоляторов.

В настоящее время разработаны состав малощелочного изоляторного стекла и технология производства изоляторов из закаленного стекла. Согласно этой технологии стекломасса, поступающая из ванной печи, подается в чугунную пресс-форму автоматического пресса. С помощью пуансона происходит прессование изолятора. Затем нагретый изолятор извлекается из формы и равномерно обдувается со всех сторон холодным воздухом, поступающим через сопла.

Механическая прочность закаленных стеклянных изоляторов в 2–3 раза выше, чем незакаленных, и выше, чем у фарфоровых изоляторов. Поэтому габариты закаленных стеклянных изоляторов меньше (на 10–20%) по сравнению с фарфоровыми. Электрические и механические характеристики малощелочного стекла приведены в табл. 12.

Таблица 12. **Основные характеристики малощелочного стекла**

Характеристика	Малощелочное стекло
Плотность, кг/м^3	260
Разрушающее напряжение при статическом изгибе, Н/м^2	$2500 \cdot 10^5$
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	10^{12}
Удельное поверхностное сопротивление, Ом	10^{14}
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,02–0,025
Среднее значение электрической прочности, МВ/м	40–45

Стеклянные изоляторы малых габаритов (штыревые на напряжения до 10 кВ и некоторые другие) изготовляют не из закаленного, а из отожженного стекла. В этом случае изоляторы, отпрессованные на пресс-автоматах, отжигают в печах. При этом температура изоляторов медленно повышается, а затем медленно понижается до комнатной температуры.

В процессе отжига у стеклянных изоляторов уничтожаются все внутренние напряжения, возникшие за счет их неравномерного охлаждения при прессовании.

§ 28. Минеральные диэлектрики

К минеральным диэлектрикам широкого применения относятся: асбест и асбестоцемент.

Асбест (горный лен) представляет собой природный минерал, характерным свойством которого является его волокнистое строение. Волокна легко расщепляются на тонкие отдельные волоски диаметром в тысячные доли миллиметра и длиной до нескольких сантиметров. Для изготовления различных электроизоляционных материалов (бумаги, пряжи, ленты, картона) используется преимущественно хризотиловый асбест, представляющий собой силикат магния ($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$).

Волокна асбеста не впитывают воду, но покрываются водяной пленкой. В результате гигроскопичности и наличия в асбесте различных примесей электрические свойства асбестовых материалов (асбестовые бумаги и ткани) невысокие: ($\rho_v = 10^6$ Ом·м; $E_{пр} = 1 \div 2$ МВ/м).

Основные характеристики асбеста: плотность 2500 кг/м^3; $\sigma_p = (300 \div 400) \cdot 10^5$ Н/м^2.

Основным достоинством асбеста является его высокая нагревостойкость и негорючесть. При температуре около 1450 °С асбест плавится. Рабочая температура асбеста 450 °С. При температуре выше 450 °С из асбеста начинает удаляться химически связанная вода и волокна его теряют механическую прочность.

Из асбестовых волокон изготовляют электроизоляционную бумагу толщиной 0,2–1 мм и картоны толщиной 2–10 мм. Для повышения механической прочности асбестовой бумаги в нее вводят небольшое количество хлопчатобумажного волокна. Кроме того, выпускают бумаги, состоящие из волокон одного асбеста, что обеспечивает им более высокую нагревостойкость. Влагопоглощение асбестовых бумаг и картонов составляет 3–4 % за 24 ч.

Из асбестовой пряжи изготовляют асбестовые ткани и ленты. Толщина асбестовых тканей 1,6–2,9 мм.

Асбестовые ленты полотняного переплетения изготовляют из пряжи, в которой содержится около 30 % хлопчатобумажных волокон, введенных с целью повышения механической прочности. Их выпускают толщиной 0,4–0,6 мм и шириной 20–30 мм. Они служат для изоляции катушек полюсов и секций обмоток электрических машин высокого напряжения. Там же находят применение ленты из железистого асбеста, содержащие около 8 % оксидов железа. Удельное объемное сопротивление этих лент поэтому сильно понижено: $\rho_v = 10^3 \div 10^4$ Ом·м. Эти ленты применяют для выравнивания электрического поля на частях обмоток, выходящих из пазов сердечника статора, где наблюдается концентрация силовых линий электрического поля, что может вызвать пробой изоляции обмоток.

Почти все асбестовые материалы применяют в пропитанном (лаками и компаундами) виде. В результате пропитки устраняется гигроскопичность асбестовых бумаг и тканей и улучшаются их электрические характеристики.

Асбестоцемент изготавливают из асбестового волокна и портландского цемента. Он представляет собой неорганическую пластмассу, в которой связующим веществом является портландцемент, а наполнителем – асбестовые волокна.

Процесс изготовления асбестоцемента состоит в смешивании распущенного асбеста с цементом и водой. Тщательно перемешанную смесь отливают в листы на особой асбестоцементной машине. Сырые листы прессуют, высушивают и разрезают на доски.

Размеры выпускаемых досок должны составлять по длине 1200 мм, ширине 700 и 800 мм, толщине 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 мм. Механическая прочность досок характеризуется величиной ударной вязкости, которая должна быть не менее 29 – 78 кДж/м^2.

Водопоглощение непропитанных асбестоцементных досок большое: 15 – 20 %. Поэтому асбестоцементные доски используют в электрических устройствах низкого напряжения (основания контакторов, перегородки и искрогасительные камеры в электрических аппаратах), преимущественно в пропитанном виде. Пропитку изделий из асбестоцемента производят в расплавленном парафине, битуме и т. д. после их механической обработки (сверления, фрезерования и др.) и после сушки изделий при 110 – 120 °С.

§ 29. Электрическая проводимость и пробой твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках наблюдается преимущественно ионная электрическая проводимость. При этом ток сквозной проводимости представляет собой направленное перемещение свободных ионов. Последние образуются в результате диссоциации (распада) молекул примесей, имеющихся в небольшом количестве в диэлектриках. Такими примесями могут быть: органические кислоты, щелочные оксиды (Na_2O; K_2O), влага и другие загрязнения, молекулы которых распадаются на ионы.

В токе проводимости твердых диэлектриков могут участвовать и ионы самого диэлектрика, т. е. собственные ионы, что наблюдается при повышенных температурах. В связи с этим удельная объемная проводимость твердого диэлектрика с некоторой температуры резко возрастает (рис. 22). Так у электротехнического фарфора резкое возрастание удельной объемной проводимости наблюдается от 100 °С и выше.

При приложении к твердым диэлектрикам больших напряжений в них образуются еще и свободные электроны. Наряду со свободными ионами они принимают участие в токе проводимости, который возрастает. При этом объемная электрическая проводимость твердого диэлектрика увеличивается.

Поверхностная электрическая проводимость твердых диэлектриков зависит от степени увлажнения и загрязнения их поверхности. Чем сильней увлажнена и загрязнена поверхность твердого диэлектрика, тем меньше удельным поверхностным сопротивлением будет обладать такой диэлектрик. Возникает необходимость защиты поверхности твердых диэлектриков

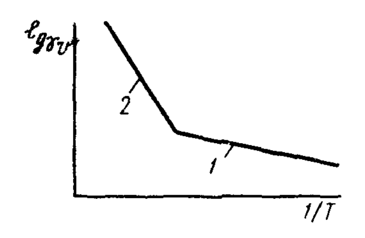


Рис. 22. Зависимость удельной объемной проводимости твердого кристаллического диэлектрика от температуры:

1 – область примесной проводимости, 2 – область собственной проводимости

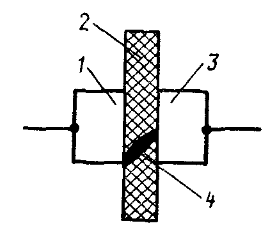


Рис. 23. Схема образования в твердом диэлектрике канала при тепловом пробое:

1, 3 – металлические электроды, 2 – диэлектрик, 4 – канал с повышенной проводимостью – направление теплового пробоя

гидрофобными, несмачиваемыми водой покрытиями: лаками и эмалями.

Пробой твердых диэлектриков – это электрический или тепловой процесс. *Электрический пробой* начинается с явления ударной ионизации, возникающей при больших напряжениях, приложенных к диэлектрику. Процесс ударной ионизации в твердом диэлектрике сходен с процессом ударной ионизации в газах *, но протекает при значительно бо́льших напряженностях электрического поля. В результате частых соударений свободных электронов с молекулами и атомами диэлектрика освобождаются новые электроны. Они создают электронную лавину, пронизывающую твердый диэлектрик по всей его толщине. При этом диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства.

Электрический пробой твердых диэлектриков на практике встречается редко. Он может возникать в тех случаях, когда потери энергии в диэлектрике незначительны и обеспечен хороший отвод тепла. При электрическом пробое электрическая прочность мало зависит от толщины диэлектрика и его температуры.

Тепловой пробой – это явление теплового разрушения диэлектрика: расплавление, прожигание его по каналу, соединяющему два противоположных электрода диэлектрика (рис. 23). Часть объема диэлектрика может обладать повышенной электрической проводимостью, вследствие чего в нем (канале) будет проходить заметный ток проводимости. Этот ток вызовет выделение тепла и нагрев этого канала, что приведет

* См. § 8.

к понижению его электрического сопротивления и, следовательно, к возрастанию тока сквозной проводимости. Это, в свою очередь, вызовет дополнительное выделение тепла в канале и перегрев этой части объема диэлектрика. При дальнейшем повышении напряжения ток проводимости в канале еще больше возрастет, а выделяемое им тепло может вызвать сплошное прожигание или расплавление твердого диэлектрика.

Электрическая прочность при тепловом пробое в значительной степени зависит от температуры (см. рис. 6) и уменьшается с увеличением толщины диэлектрика. С повышением температуры или с увеличением толщины твердого диэлектрика отвод теплоты из него будет затруднен. Это приведет к перегреву места пробоя в диэлектрике, и тепловое разрушение диэлектрика произойдет при меньшей напряженности электрического поля.

Контрольные вопросы

1. Опишите процесс электропроводности в газообразных диэлектриках.
2. Каков состав нефтяных электроизоляционных масел?
3. Какие требования предъявляют к электроизоляционным маслам, применяемым в трансформаторах?
4. От каких факторов зависит электрическая прочность жидких диэлектриков?
5. Что такое полимеризация и поликонденсация?
6. Каковы основные свойства поливинилхлорида, поливинилхлоридного пластиката? Где применяются эти материалы?
7. Каковы основные свойства нагревостойких органических диэлектриков?
8. Что представляют собой электроизоляционные лаки и компаунды, на какие группы они делятся?
9. Что представляют собой пластмассы и из каких основных частей они состоят?
10. Что представляют собой компаунды и на какие группы они делятся?
11. Что представляют собой слоистые электроизоляционные пластмассы и где они применяются в электротехнике?
12. Что представляют собой электрокерамические материалы и на какие группы они делятся?
13. Какие виды пробоя могут возникнуть в твердых диэлектриках?

ГЛАВА III. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 30. Проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением

Металлические проводниковые материалы являются веществами поликристаллического строения, т. е. они состоят из множества мелких кристалликов. Большинство металлических

проводников (серебро, медь, алюминий и др.) обладают большой проводимостью. Они имеют малую величину удельного электрического сопротивления: $\rho = 0{,}0150 \div 0{,}0283$ мк Ом·м*. Это преимущественно чистые металлы, которые идут для изготовления проводов и кабелей**. Наряду с проводниками большой проводимости требуются также проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением $\rho = 0{,}4 \div 2{,}0$ мк Ом·м. Эти проводниковые материалы идут для изготовления образцовых сопротивлений, резисторов, нагревательных приборов и др. Все металлические проводниковые материалы обладают электронной электропроводностью, т. е. ток проводимости в них представляет собой направленное перемещение свободных электронов.

С ростом температуры электрическое сопротивление металлических проводников возрастает. Это объясняется тем, что с ростом температуры тепловые колебания атомов проводника становятся более интенсивными. При этом перемещающиеся в проводнике электроны все чаще сталкиваются с атомами, встречая сопротивление на пути своего перемещения. В силу этого температурный коэффициент удельного сопротивления у всех проводников больше нуля.

Важнейшие проводниковые материалы с большой проводимостью — медь, бронза, алюминий.

Проводниковая медь представляет собой очищенный от различных примесей металл красновато-оранжевого цвета с температурой плавления 1083 °С и температурным коэффициентом линейного расширения, равным $17 \cdot 10^6$ 1/°С. Медь обладает хорошими механическими свойствами, а также пластичностью. Это позволяет получать из меди проволоку диаметром до 0,03—0,01 мм, а также тонкие ленты. Проводниковая медь очень устойчива к атмосферной коррозии, этому способствует тонкий слой оксида (CuO), которым медь покрывается на воздухе. Защитный слой оксида препятствует дальнейшему проникновению кислорода воздуха к меди.

Отечественная промышленность выпускает проводниковую медь шести марок с различной степенью чистоты. Примесями в меди являются: висмут, сурьма, железо, свинец, олово, цинк, никель, фосфор, сера, мышьяк и кислород. У наиболее чистого сорта проводниковой меди (марка М00б) сумма всех примесей не превосходит 0,01 %. Для изготовления провод-

*1 мк Ом·м = 1 Ом·мм²/м.

** Подробней об обмоточных, монтажных и установочных проводах и кабелях см.: Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М., Высшая школа, 1982.

никовых изделий (обмоточные и монтажные провода и кабели) применяют сорта проводниковой меди с содержанием примесей не более 0,05–0,1 %. Медную проволоку изготовляют круглого и прямоугольного сечения. Круглую проволоку выпускают диаметром от 0,02 до 10 мм. Меньшая сторона *a* проволоки (шин) прямоугольного сечения находится в пределах от 0,8 до 4 мм, а большая сторона *b* – от 2 до 30 мм. Медную проволоку изготовляют из мягкой, т. е. отожженной при оптимальной температуре (марка ММ) и твердой неотожженной (марка МТ) меди.

У изделий из мягкой меди основные характеристики следующие: плотность 8900 кг/м³; разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_р = (20 \div 27) \cdot 10^7$ Н/м²; относительное удлинение $e_р = 6 \div 35\%$; $\rho = 0{,}0172 \div 0{,}01724$ мк Ом·м. У изделий из твердой меди: плотность 8960 кг/м³, $\sigma_р = (35 \div 44) \cdot 10^7$ Н/м²; $e_р = 0{,}5 \div 2\%$; $\rho = 0{,}0177 \div 0{,}0180$ мк Ом·м.

Проволока меньшего диаметра обладает большим разрушающим напряжением при растяжении и бóльшими значениями удельного электрического сопротивления. Для проводов очень малого диаметра (0,01 мм) и предназначенных для работы при повышенных температурах (выше 300 °С) применяют проволоку, изготовленную из бескислородной меди, отличающейся наивысшей чистотой. Температурный коэффициент удельного сопротивления ТК $\rho = 0{,}0043$ 1/°С для всех марок меди.

Бронзы – сплавы на основе меди, отличающиеся малой объемной усадкой при литье изделий. Объемная усадка у бронз 0,6–0,8 %, в то время как усадка у стали и чугуна – 1,5–2,5 %.

Основные типы бронзы представляют собой сплавы меди с оловом (оловянные бронзы), алюминием (алюминиевые), бериллием (бериллиевые) и другими легирующими элементами. Марки бронз обозначаются буквами Бр. (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, показывающие, какие легирующие элементы и в каком количестве содержатся в данной бронзе (табл. 13).

Таблица 13. **Марки и состав некоторых бронз**

Марка бронзы	Содержание легирующих элементов, % мас.					
	олово	фосфор	бериллий	алюминий	никель	медь
Бр.О10	10	–	–	–	–	Остальное
Бр.ОФ6,5-0,15	6–7	0,15	–	–	–	»
Бр.А7	–	–	–	6–8	–	»
Бр.Б2	–	–	2–2,2	–	0,2–0,5	»

Бронзы хорошо обрабатываются резанием, давлением и хорошо паяются. Из них изготовляют ленты и проволоку, из которых производят пружинящие контакты, токоведущие пружины и другие токопроводящие и конструкционные детали.

Для упрочнения бронзовых деталей производят их термическую обработку: закалку, а затем отпуск при оптимальных температурах.

В отношении электропроводности бронзы уступают меди, но превосходят ее по механической прочности, упругости, сопротивлению истиранию и коррозионной стойкости. В табл. 14 приведены основные характеристики бронз в сравнении с медью.

Таблица 14. **Основные характеристики бронз и меди**

Материал	Характер обработки	Проводимость, %	Разрушающее напряжение при растяжении, $Н/м^2$	Относительное удлинение при растяжении, %
Проводниковая медь (99,95 % меди)	Мягкая	100	$(20 \div 27) \cdot 10^7$	35
	Твердая	98	$(36 \div 44) \cdot 10^7$	2
Бериллиевая бронза (2 % бериллия; 0,5 % никеля; остальное – медь)	Мягкая	36	$(70 \div 79) \cdot 10^7$	20
	Твердая	26	$(160 \div 175) \cdot 10^7$	9
Фосфористая бронза (6–7 % олова; 0,15 % – фосфора; остальное – медь)	Мягкая	15	$(40 \div 45) \cdot 10^7$	60
	Твердая	10	$(95 \div 105) \cdot 10^7$	3

Из проводниковых бронз изготовляют провода для линий электрического транспорта, пластины для коллекторов электрических машин, токопроводящие пружины и контактные упругие детали для электрических приборов.

Алюминий является вторым после меди проводниковым материалом благодаря его сравнительно большой проводимости и стойкости к атмосферной коррозии. Алюминий относится к группе легких металлов, поскольку его плотность 2700 $кг/м^3$, т. е. он в 3,3 раза легче меди. Алюминий – металл серебристо-белого цвета с температурой плавления 658 °С, отличающийся малой твердостью и сравнительно небольшой механической прочностью при растяжении $(7,5 \div 18) \cdot 10^3$ $Н/м^2$, кроме того, алюминий имеет увеличенный по сравнению с медью температурный коэффициент линейного

расширения ($24 \cdot 10^{-6}$ 1/°С), что является недостатком алюминия.

На воздухе алюминий очень быстро покрывается тонкой пленкой оксида (Al_2O_3), который надежно защищает его от проникновения кислорода воздуха. В то же время эта пленка обладает значительным электрическим сопротивлением. Поэтому в плохо зачищенных местах соединений алюминиевых проводов могут быть большие переходные сопротивления.

При увлажнении мест соединения алюминиевых проводов с проводами из других металлов могут образоваться гальванические пары. При этом алюминиевый провод будет разрушаться возникающими местными гальваническими токами. Чтобы избежать образования гальванических пар, места соединений тщательно защищают от влаги (например, лакированием). Чем выше химическая чистота алюминия, тем лучше он сопротивляется коррозии.

Отечественная промышленность выпускает проводниковый алюминий 13 марок с различной степенью чистоты. В марках алюминия особой чистоты примесей (железо, кремний, цинк, титан и медь) содержится не более 0,005%. Из этих сортов алюминия изготовляют электроды электролитических конденсаторов, а также алюминиевую фольгу. Проволоку для проводов изготовляют из алюминия, содержащего не более 0,3 и 0,5% (марки А7Е и А5Е). Выпускают мягкую (АМ), полутвердую (АПТ) и твердую (АТ) алюминиевую проволоку диаметром от 0,08 до 10 мм и шины прямоугольного сечения.

Изделия из мягкого алюминия имеют следующие характеристики: $\sigma_р = (8 \div 10) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_р = 10 \div 25\%$; $\rho = 0{,}028$ мк Ом·м; изделия из полутвердого алюминия: $\sigma_р = (9{,}0 \div 14) \cdot 10^7$ Н/м^2, $e_р = 3\%$; $\rho = 0{,}0283$ мк Ом·м, изделия из твердого алюминия $\sigma_р = (10 \div 18) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_р = 0{,}5 \div 2\%$; $\rho = 0{,}0283$ мк Ом·м. Температурный коэффициент удельного сопротивления для всех марок алюминия принимается равным 0,00423 1/°С.

Алюминиевые провода и токоведущие детали можно соединять друг с другом горячей или холодной сваркой, а также пайкой, но с применением специальных припоев и флюсов. Холодную сварку производят в специальных устройствах, в которых зачищенные поверхности алюминиевых деталей соприкасаются друг с другом при давлении примерно $10000 \cdot 10^5$ Н/м^2. При этом происходит диффузия кристаллов из одной соединяемой детали в другую, в результате чего детали надежно соединяются друг с другом. Листовой алюминий широко применяется для экранов.

Серебро относится к группе благородных металлов, не окисляющихся на воздухе при комнатной температуре. Интенсивное окисление серебра начинается при температуре от 200 °С и выше. Так же как все благородные металлы, серебро отличается высокой пластичностью, позволяющей получать фольгу и проволоку диаметром до 0,01 мм. Кроме того, серебро отличается наивысшей проводимостью.

Основные характеристики проводникового серебра следующие: плотность 10 500 кг/м^3; температура плавления 960,5 °С; ТКЛР = $19{,}3 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, т. е. немного больше, чем у меди; изделий из мягкого серебра: $\sigma_p = (15 \div 18) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_p = 45 \div 50\%$; $\rho = 0{,}015$ мкОм · м; изделий из твердого серебра; $\sigma_p = (2030) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_p = 46\%$; $\rho = 0{,}0158$ мк Ом · м; ТКρ = 0,00369 1/°С.

По сравнению с медью и алюминием серебро находит ограниченное применение: в сплавах с медью, никелем или кадмием – для контактов в реле и в других приборах на небольшие токи, а также в припоях ПСр-10; ПСр-25 и др.

Вольфрам относится к группе тугоплавких металлов, широко применяется в электротехническом производстве в качестве износостойкого материала для электрических контактов и для деталей в электровакуумных приборах (нити ламп накаливания, электроды и др.).

Вольфрам – металл серого цвета с очень высокой температурой плавления и большой твердостью. Вольфрам получают методом порошковой металлургии, т. е. в результате спекания спрессованных частиц металла. Для этого из частиц вольфрама (порошка) прессованием в стальных пресс-формах получают заготовки – стержни. Затем их подвергают спеканию при температуре 1300 °С. У спеченных вольфрамовых стержней наблюдается еще зернистое строение, и они обладают хрупкостью. Потом вольфрамовые стержни нагревают до температуры 3000 °С. Для получения механически прочного металла стержни подвергают многократной ковке и волочению с перемежающимися периодами отжига. В результате такой обработки вольфрам приобретает волокнистое строение, обеспечивающее ему высокую механическую прочность и пластичность. Из вольфрама изготовляют проволоку диаметром до 0,01 мм. Окисление вольфрама на воздухе начинается при температуре от 400 С и выше. В вакууме вольфрамовые детали могут работать при температурах до 2000 °С.

Основные характеристики вольфрама следующие: плотность 19 300 кг/м^3; температура плавления 3380 °С; у изделия из отожженного вольфрама: $\sigma_p = (5 \div 8) \cdot 10^8$ Н/м^2; $\rho = 0{,}0503$ мк Ом · м; у изделий из твердого вольфрама; $\sigma_p =$

$= 18 \cdot 10^8$ Н/м^2; $\rho = 0{,}0612$ мк Ом · м. Температурный коэффициент сопротивления ТК $\rho = 0{,}0046$ 1/°С.

§ 31. Проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением *

Эта группа проводниковых материалов представляет собой сплавы металлов, обладающих большим удельным сопротивлением и малым значением температурного коэффициента удельного сопротивления. Это позволяет создавать из этих сплавов термостабильные резисторы и другие изделия, электрическое сопротивление которых практически не зависит от температуры.

Перечисленными свойствами обладают сплавы, представляющие собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой. Основные представители этой группы проводниковых материалов – сплавы меди с никелем, известные под названием манганин и константан.

Манганин – сплав 84–86 % меди, 2–3 % никеля и 12–13 % марганца **. Цвет манганина светло-оранжевый, плотность 8400 кг/м^3, температура плавления 960 °С, ТКЛР = $= 18 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

Основные характеристики мягких изделий из манганина: $\sigma_p = (45 \div 55) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_p = 10 \div 25\%$, $\rho = 0{,}42 \div 0{,}47$ мк Ом · м; твердых изделий $\sigma_p = (55 \div 58) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_p = 5 \div 9\%$, $\rho = 0{,}47 \div 0{,}5$ мк Ом · м; ТК $\rho = (2 \div 6) \cdot 10^{-5}$ 1/°С. Для увеличения удельного электрического сопротивления до 1,5–2 мк Ом · м в состав манганина вводят повышенные количества марганца (60–67%) и никеля (16–30%) за счет уменьшения содержания меди.

Достоинством манганиновых изделий является то, что их электрическое сопротивление очень мало зависит от температуры. Другое их достоинство – весьма малая термо-эдс в контакте с медью (0,9–1 мкВ/°С).

Для стабилизации электрических характеристик манганиновых изделий их подвергают тепловой обработке в вакууме при 400 °С и последующей длительной выдержке при комнатной температуре. В результате такой обработки повышается однородность сплава и стабилизируются его свойства. Наибольшая допустимая температура для изделий из стабилизированных сортов манганина 200 °С, из нестабилизирован-

---

* Эти материалы также называют сплавами высокого электрического сопротивления.

** В некоторые сорта манганина вводят еще кобальт.

ных 60 °С. При превышении этих температур в манганиновых изделиях происходит необратимое изменение свойств.

Из манганина изготовляют мягкие и твердотянутые проволоки диаметром 0,02 – 6 мм и ленты толщиной до 0,08 мм и шириной до 270 мм. Кроме того, выпускают манганиновые обмоточные провода с эмалевой изоляцией, с изоляцией из натурального шелка, а также изолированные эмалью и одним слоем натурального шелка. Манганиновые изделия применяют в производстве резисторов и потенциометров высокого класса.

Константан – сплав 58 – 60 % меди, 32 – 40 % никеля и 1 – 2 % марганца. Цвет константана – серебристо-желтый, плотность 8900 кг/м^3; температура плавления 1260 °С, ТКЛР = 14 × × 10^{-6} 1/°С.

Основные характеристики константановых изделий (проволоки): мягкой (отожженной): $\sigma_p = (40 \div 50) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_p = 40 \div 50$ %; $\rho = 0,45 \div 0,48$ мк Ом · м; твердотянутой $\sigma_p = (65 \div 72) \cdot 10^7$ Н/м^2; $e_p = 2 \div 5$ %; $\rho = 0,46 \div 0,52$ мк Ом · м. Температурный коэффициент удельного сопротивления у изделий из константана: $(0 \div 6) \cdot 10^{-5}$ 1/°С, т. е. у многих составов константана электрическое сопротивление не изменяется с изменением его температуры.

Из константана изготовляют мягкие и твердые изделия: проволоку диаметром от 0,03 до 5 мм и ленту толщиной до 0,1 мм. Изолированная константановая проволока в паре с медной применяется для изготовления термопар. Константановые изделия (проволока, ленты) могут использоваться при температурах не выше 500 °С.

§ 32. Жаростойкие проводниковые материалы

Жаростойкими проводниковыми материалами являются сплавы на основе никеля, хрома и некоторых других компонентов. Жаростойкость этих сплавов, т. е. их неокисляемость при высоких температурах, обусловлена образованием на их поверхности окисной пленки большой плотности, исключающей доступ кислорода к сплаву. Основой жаростойких окисных пленок являются оксид хрома Cr_2O_3 и закись никеля NiO, которые не испаряются с поверхности сплава при высоких температурах. Жаростойкие проводниковые материалы на основе никеля, хрома и алюминия называются соответственно: нихромами, фехралями и хромалями. Все они представляют собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой, поэтому эти сплавы обладают большим

Т а б л и ц а 15. **Состав и основные характеристики жаростойких проводниковых сплавов**

Марка сплава	Тип сплава	Состав, % мас.					Удельное сопротивление, мк Ом · м	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	Допустимая температура, °С
		хром	никель	алюминий	титан	железо			
Х15Н60	Нихром	15 – 18	55 – 61	–	–	Остальное	1,06 – 1,17	$12 \cdot 10^{-5}$	950 – 1000
Х20Н80	»	20 – 23	77 – 80	–	–	»	1,04 – 1,17	$9 \cdot 10^{-5}$	1050 – 1100
Х13Ю4	Фехраль	12 – 15	0,6	3,5 – 5,5	–	»	1,2 – 1,34	$15 \cdot 10^{-5}$	850 – 950
Х23Ю5Т	Хромаль	26 – 28	0,6	5,0 – 5,8	–	»	1,3 – 1,5	$5 \cdot 10^{-5}$	1000 – 1150

П р и м е ч а н и е: Плотность сплавов, перечисленных в таблице: $(7,2 \div 8,4) \cdot 10^3$ кг/м^3; разрушающее напряжение при растяжении $(65 \div 80) \cdot 10^7$ Н/м^2.

удельным сопротивлением и малыми значениями температурного коэффициента сопротивления.

В марках сплавов буквы обозначают главные части сплава: хром (Х), никель (Н), алюминий (Ю) и титан (Т). Цифра, стоящая за буквой, указывает в среднем количество этого металла в сплаве. Например, в нихроме марки Х20Н80 содержится: 20 % хрома и 80 % никеля (по массе).

В табл. 15 приведены состав и основные характеристики некоторых жаростойких сплавов, широко применяемых на практике.

Кроме основных компонентов, перечисленных в табл. 15, в состав жаростойких сплавов входят примеси (0,06 – 0,15 % углерода, 0,5 – 0,35 % фосфора и 0,03 % серы), которые вызывают некоторую хрупкость проволоки и лент, изготовленных из этих сплавов. В производстве всех проводниковых сплавов стараются содержание примесей свести к минимуму.

Главными областями применения изделий из жаростойких сплавов (проволока и ленты) являются электронагревательные приборы, реостаты и резисторы.

§ 33. Металлокерамические материалы и изделия

Металлокерамическими называют материалы, получаемые прессованием из металлических порошков с последующим спеканием их при высоких температурах (1000 – 1400 °С). Исходные порошкообразные массы состоят из двух или более порошков различных металлов, из которых один должен обладать более высокой температурой плавления по сравнению с порошками других металлов. При высокотемпературной обработке – спекании изделий из порошкообразной массы более легкоплавкие порошки плавятся и заполняют поры между частицами тугоплавкого металла. В результате этого получают монолитные маталлокерамические изделия. В других случаях, наоборот, нужно получить пористые металлокерамические изделия, например подшипники, фильтры и др. Для этого применяют твердофазное спекание частиц порошков металла, обладающих приблизительно одинаковой температурой плавления. Иногда в исходную массу, состоящую из металлических порошков, вводят порошок неметалла, например графита. Такие массы применяют для изготовления металлографитных щеток для электрических машин *, электрических контактов и других деталей. Описанные способы получения изделий из спрессованных порошкообразных масс с последую-

---

* См. § 33.

щим спеканием их частиц при высоких температурах относятся к порошковой металлургии.

Методы порошковой металлургии применяют в тех случаях, когда нельзя получить изделия из сплавов особо тугоплавких металлов или из сплавов особо чистых металлов, или когда необходимо получить изделия из сплава металлов с неметаллами. Кроме того, методы порошковой металлургии позволяют получать изделия с точно заданными размерами без последующей механической обработки. В результате этого резко снижаются потери в виде отходов металла. В электротехническом производстве методы порошковой металлургии широко применяются для изготовления электроугольных изделий, некоторых видов магнитных материалов* и сильноточных электрических контактов.

По сравнению с металлическими контактами из серебра, меди, вольфрама и сплавов металлов металлокерамические контакты отличаются большой износостойкостью, допускают большие силы сжатия и обладают стойкостью к эрозии**. В электрических аппаратах низкого напряжения находят широкое применение контакты из металлокерамического материала на основе порошков серебра и оксида кадмия ($CdO \approx 15\%$). Они обладают всеми характерными свойствами металлокерамических изделий. Кроме того, могут надежно работать в условиях тропического климата.

В качестве сильноточных дугоразмыкающих контактов применяют металлокерамические детали, изготавливаемые из порошков серебра, вольфрама (40–50%) и никеля (2–3%). Металлокерамические детали этого состава обладают пластичностью и допускают все виды механической обработки.

Металлокерамические контакты, изготовляемые из порошков меди и графита, отличаются высокой устойчивостью к свариванию при размыкании больших токов (30000–100000 А). Это достигается не только составом и структурой металлокерамического материала на основе порошков меди и графита (3–5%), но и наличием в материале 10–15% пор. В производстве металлокерамических изделий количество пор в них можно изменять в широких пределах. В металлокерамических контактах на небольшие токи пористость не должна превышать 2–5%. Это достигается повторным прессованием металлокерамических изделий с последующей тепловой обработкой – отжигом.

---

* См. § 40.

** Эрозия – разрушение поверхности контактов под действием электрических искр и дуг.

§ 34. Электроугольные изделия

К электроугольным изделиям относят щетки для электрических машин, контактные детали, электроосветительные угли и др.

Электроугольные изделия изготовляют методами порошковой технологии из смеси углеродистых материалов: графита, кокса, сажи, антрацита. В исходный состав некоторых электроугольных изделий вводят еще металлические порошки (медный, свинцовый, оловянный и др.). Кроме того, в производстве электроугольных изделий применяют связующие вещества – каменноугольные и синтетические смолы; бакелитовые, кремнийорганические и др.

Все углеродистые материалы, за исключением графита и сажи, предварительно прокаливают при температурах 1200–1300 °С с целью удаления из них летучих веществ и уменьшения объемной усадки электроугольных изделий. Прокаленные углеродистые материалы измельчают в дробилках до порошкообразного состояния. Взятые в определенном соотношении исходные порошкообразные материалы (углеродистые и металлические) тщательно смешивают друг с другом. Затем в смесь вводят связующие вещества (смолы, пеки), которые смешивают с порошкообразными материалами при температуре 110–230 °С, пропуская их через специальные смесители.

Полученную после смешивания исходную электроугольную массу сушат, а затем размалывают и просеивают через сито. В результате этого получают прессовочный порошок (пресс-порошок). Из него изготовляют прессованием в стальных пресс-формах различные электроугольные изделия или заготовки (блоки), из которых распиливанием и шлифованием получают электрощетки и другие изделия. Электроугольные изделия прессуют при комнатной температуре или при 180–210 °С (в зависимости от взятого связующего). В случае применения связующего, размягчающегося или полимеризующегося при повышенных температурах, прессование электроугольных изделий производят при повышенных температурах. Прессуют электроугольные изделия при давлениях от 100 до 300 МПа.

Изделия с большой линейной протяженностью (электроосветительные угли и др.) изготовляют методом выдавливания нагретой пластичной исходной массы через стальной мундштук винтового пресса. Затем полученные электроугольные изделия или их заготовки (блоки) подвергают высокотемпературной обработке – обжигу в специальных печах в

интервале температур от комнатной до 1200–1300 °С. В процессе обжига происходит спекание – соединение частиц исходных материалов и цементация их коксом, образующимся из связующих органических веществ.

В результате обжига электроугольные изделия приобретают механическую прочность и способность к механической обработке. При этом уменьшается величина их удельного электрического сопротивления. Электроугольные изделия, содержащие сажу, кокс и другие неграфитовые компоненты, после обжига подвергают дополнительной термической обработке (при 2400–2800 °С), называемой *графитизацией*. При этом неграфитовые компоненты в изделиях превращаются в графит, а большинство примесей испаряется. В результате графитизации электрощетки (группы ЭГ) и другие изделия приобретают некоторую мягкость, уменьшается коэффициент трения и резко снижается их удельное электрическое сопротивление.

Полученные после графитизации и механической обработки (резка, шлифование) электроугольные изделия обладают значительной пористостью (до 30 %). Поэтому их подвергают пропитке лаками или воскообразными веществами, а в некоторых случаях и расплавленными металлами (олово, свинец и др.). Пропитку электроугольных изделий производят при температурах 80–200 °С и выше, когда пропитывающее вещество находится в жидком состоянии. Пропитка имеет целью устранить пористость и уменьшить гигроскопичность электроугольных изделий, а иногда ввести в них смазочные вещества (воскообразные). Пропитка электроугольных изделий металлами резко увеличивает механическую прочность и повышает их проводимость.

Электроугольные изделия (электрощетки и др.) подвергают механической обработке для придания им окончательной формы и чистоты поверхности. Заготовки (блоки) электрощеток и других изделий разрезают на мелкие части с помощью фрез или тонких карборундовых кругов на специальных станках. Затем в изделиях сверлят отверстия под гибкие соединительные провода.

Некоторые типы электрощеток и осветительных углей после механической обработки подвергают омеднению. Для этого часть их поверхности покрывают тонким слоем меди для создания надежного электрического контакта между телом электрощетки и щеткодержателем в электрической машине. Омеднение изделий производят гальваническим методом. Образующийся на изделиях слой меди имеет толщину 10–15 мкм. Гибкие (многопроволочные) провода крепят в теле электрощетки развальцовкой, пайкой или запрессовкой. У гото-

вых электрощеток проверяют размеры, твердость, механическую прочность, удельное электрическое сопротивление, падение напряжения между щеткой и коллектором, коэффициент трения, переходное сопротивление между токоподводящим проводом и электрощеткой и другие характеристики.

Из электроугольных изделий наибольшее применение получили щетки для электрических машин и контактные детали. Различают следующие виды щеток: графитные, угольно-графитные, металлографитные и электрографитированные*.

Графитные щетки изготовляют из натурального графита. Они отличаются мягкостью, не вызывают шума при работе и применяются при окружных скоростях от 20 до 40 м/с. Их удельное электрическое сопротивление 8—30 мк Ом·м.

Угольно-графитные щетки изготовляют из графита, сажи, кокса и связующих смол. Эти щетки обладают повышенной твердостью, механической прочностью и абразивностью. Они могут очищать оксидные пленки на коллекторах и кольцах электрических машин. Щетки применяются при окружных скоростях от 10 до 40 м/с. Их удельное сопротивление 100—400 мк Ом·м.

Металлографитные щетки изготовляют из порошков графита и меди, а в некоторые вводят еще порошки олова и серебра. Эти щетки обладают малой величиной удельного электрического сопротивления: 0,3—0,80 мк Ом·м, у щеток с пониженным содержанием меди удельное сопротивление 5—22 мк Ом·м. Эти щетки применяются при окружных скоростях 20—25 м/с.

Электрографитированные щетки изготовляют из графита, кокса, сажи и связующих смол. После прессования и обжига в печах щетки поступают в электрические печи для графитизации при 2500 °С. При этом состав щеток обогащается графитом, что обеспечивает щеткам повышенную механическую прочность и возможность использования их при повышенных окружных скоростях 40—90 м/с. Удельное электрическое сопротивление щеток 12—75 мк Ом·м. Эта группа щеток применяется в электрических машинах с тяжелыми условиями коммутации.

Электроугольные электроды отличаются стойкостью к электрической дуге, они очень медленно окисляются, не горят и не плавятся до температуры 3800 °С. Находят широкое применение в электрических аппаратах большой мощности.

---

* Подробней о щетках см.: Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М., Высшая школа, 1982.

Контактные детали для электровозов, троллейбусов и других токосъемных устройств изготовляют из электроугольных и медно-графитных масс. Эти изделия в готовом виде отличаются очень малым удельным сопротивлением – 0,02 – 0,05 мк Ом · м.

Контрольные вопросы

1. На какие группы делят проводниковые материалы?
2. Перечислите основные характеристнки проводниковой меди.
3. Перечислите основные свойства бронз.
4. Перечислите основные характеристики проводникового алюминия.
5. Что представляют собой проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением?
6. Перечислите основные свойства маиганина и константана.
7. Что представляют собой жаростойкие проводниковые материалы и где они применяются?
8. Что представляют собой электроугольные материалы и на какие группы они делятся?
9. Что представляют собой металлокерамические материалы и где оии применяются?

ГЛАВА IV. ПРОВОДНИКОВЫЕ (КАБЕЛЬНЫЕ) ИЗДЕЛИЯ

§ 35. Обмоточные провода

Обмоточные провода применяют для изготовления обмоток электрических машин, электрических аппаратов и приборов. Их выпускают с жилами из проводниковой меди, проводникового алюминия и сплавов с большим удельным сопротивлением (манганин, константан, нихром и др.). Жилы обмоточных проводов могут иметь эмалевую, пленочную, волокнистую и эмалево-волокнистую изоляцию.

Провода с эмалевой изоляцией. Эмалевая изоляция имеет наименьшую толщину (0,003 – 0,060 мм) по сравнению с пленочиой и волокнистой. Это позволяет в том же объеме обмотки заложить бóльшее количество проводов и тем самым увеличить мощность электрической машины или аппарата. Эмалевая изоляция представляет собой гибкое лаковое покрытие, полученное в результате отвердения сплошного слоя эмаль-лака, нанесенного на провод, на специальных эмалировочных машинах.

В табл. 16 представлен основной сортамент медных обмоточных проводов с эмалевой изоляцией.

К основному типу обмоточных проводов нагревостойкости класса А (105 °С) относятся провода ПЭВ-1, ПЭВ-2

Таблица 16. **Основной сортамент обмоточных проводов с эмалевой изоляцией**

Марка провода	Диаметр жилы без изоляции	Наружный диаметр провода, мм	Общая характеристика
ПЭВ-1	0,02 – 2,5	0,035 – 2,6	Провод медный, изолнрованный лаком ВЛ-931
ПЭВ-2	0,05 – 2,5	0,08 – 2,63	То же, но слой эмаль-лаковый изоляции большей толщины
ПЭВА	0,08 – 2,44	0,105 – 2,55	То же, но с алюминиевой жилой
ПЭМ-1	0,05 – 2,12	0,07 – 2,22	Провод медный, изолированный лаком ВЛ-941
ПЭМ-2	0,05 – 2,12	0,08 – 2,25	То же, но слой эмаль-лаковой изоляции большей толщины
ПЭВТЛ-1	0,02 – 1,6	0,027 – 1,64	Провод медный, изолированный полиуретановым лаком, лудящийся
ПЭВТЛ-2	0,02 – 1,6	0,03 – 1,67	То же, но слой эмаль-лаковой изоляции большей толщины
ПЭТВ	0,06 – 2,5	0,07 – 2,57	Провод медный, изолированный полиэфирным лаком ПЭ-943
ПЭТВА	0,08 – 24	0,08 – 2,55	То же, но с алюминиевой жилой
ПЭТ-155	0,06 – 2,5	0,08 – 2,63	Провод медный, изолированный теплостойким лаком на полиэфиримидной основе
ПЭТ-200	0,05 – 2,5	0,057 – 2,63	Провод медный, изолированный теплостойким полиимидным лаком
ПНЭТ-имид	0,02 – 2,5	0,035 – 2,6	Провод медный, никелированный, изолированный нагревостойким полиимидным лаком.

и ПЭМ-1, ПЭМ-2 с механически прочной эмалевой изоляцией на основе поливинилацеталевых смол. Эти провода широко применяются для изготовления обмоток электрических машин общепромышленного применения. Изоляция проводов ПЭМ-1 и ПЭМ-2 стойка к нефтяному маслу, и поэтому провода находят также применение для изготовления обмоток маслонаполненных аппаратов.

Для изоляции нагревостойкости класса Е (120 С) предназначены обмоточные провода ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2, эмалированные полиуретановыми эмаль-лаками. Эмаль-лаки образуют механически прочное изоляционное покрытие проводов, обладающее термопластичностью, т. е. оно размягчается при температуре 160 °С. Это ограничивает область применения этих проводов (обмотки электрических машин и аппаратов малой мощности).

Особенностью этих проводов является то, что их можно облуживать и паять без предварительной зачистки изоляции. Последняя при пайке размягчается и в расплавленном виде является флюсующим веществом, обеспечивающим пайку проводов оловянно-свинцовыми припоями.

Более высокой нагревостойкостью (130 °С) и хорошими электроизоляционными свойствами обладают провода ПЭТВ, эмалированные полиэфирным лаком на основе лавсана.

С целью повышения механической прочности эмаль-лаковой изоляции выпускают провода ПЭТВМ с увеличенной толщиной изоляции этого же типа. Она позволяет производить механизированную намотку обмоток электрических машин и аппаратов, т. е. хорошо выдерживает многократные перегибы и растяжения.

Для изоляции класса нагревостойкости F (155 °С) выпускают провода ПЭТ-155 с эмаль-лаковой изоляцией на полиэфиримидной основе, обладающей хорошими изоляционными свойствами.

Для механизированной намотки катушек с изоляцией той же нагревостойкости выпускают провода марки ПЭТМ, эмаль-лаковая изоляция которых при той же нагревостойкости обладает повышенной механической прочностью.

Эмаль-лаковую изоляцию для работы при температуре 180–200 °С имеют провода марки ПЭТ-200. Она изготовляется на основе полиимидов, которые обладают высоким уровнем электрических и механических свойств.

Для работы при температуре 220 °С предназначены провода ПНЭТ-имид, состоящие из медной никелированной жилы, покрытой эмаль-лаковой изоляцией на полиимидной нагревостойкой основе, обладающей высоким уровнем электрических свойств.

Разработаны и применяются обмоточные провода ПЭЖБ с неорганической изоляцией (стеклоэмаль), которые могут работать при температуре 300 °С, а кратковременно – до 600 °С.

Провода с бумажной изоляцией изготовляют из медных и алюминиевых жил, имеющих изоляцию в виде обмотки из кабельной бумаги толщиной 0,10–0,12 мм. Главной областью применения проводов с бумажной изоляцией являются обмотки трансформаторов с внутренней масляной изоляцией. Бумажная изоляция, пропитанная маслом, обладает большой электрической прочностью, порядка 80 МВ/м. Толщина бумажной изоляции во много раз превосходит толщину эмаль-лаковой изоляции, но отличается значительно большей электрической прочностью.

Провода с волокнистой изоляцией изготовляют из медных и алюминиевых жил круглого и прямоугольного сечения. Изоляция жил представляет собой одинарную или двойную обмотку из хлопчатобумажной, шелковой пряжи или пряжи из синтетических (лавсан, капрон) или стеклянных волокон. Наибольшей нагревостойкостью обладают провода со стекловолокнистой изоляцией.

Основной сортамент этих проводов представлен в табл. 17. Толщина волокнистой изоляции намного превосходит толщину эмаль-лаковой изоляции, но электрическая прочность волокнистой изоляции, пропитанной лаками или компаундами, намного превосходит электрическую прочность эмалевой изоляции. Обмотки, изготовленные из проводов с волокнистой изоляцией, требуют тщательной сушки и пропитки изоляционными лаками или компаундами.

Таблица 17. **Основной сортамент обмоточных проводов с волокнистой изоляцией**

Марка провода	Диаметр жилы без изоляции	Наружный диаметр провода	Общая характеристика
ПБД	0,38 – 5,2	0,60 – 5,35	Провод медный, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи
АПБД	1,35 – 8,0	1,62 – 8,35	То же, но с алюминиевой жилой
ПЛБД	0,38 – 5,2	0,59 – 5,53	Провод медный, изолированный одним слоем обмотки из лавсанового волокна и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи
АПЛБД	1,35 – 8,0	1,62 – 8,35	То же, но с алюминиевой жилой
ПЛД	0,38 – 1,3	0,57 – 1,52	Провод медный, изолированный двумя слоями обмотки из лавсанового волокна
ПСД	0,31 – 5,2	0,55 – 5,58	Провод медный, изолированный двумя слоями обмотки из стекловолокна, пропитанной нагревостойким лаком
АПСД	1,65 – 5,2	1,90 – 5,52	То же, но с алюминиевой жилой
ПСДК	0,31 – 5,52	0,55 – 5,58	Провод медный, изолированный двумя слоями обмотки из стекловолокна, пропитанной нагревостойким кремнийорганическим лаком

* Здесь приведены провода с жилами круглого сечения, наряду с ними выпускают обмоточные провода и прямоугольного сечения.

Провода с эмалево-волокнистой изоляцией состоят из эмалированной медной жилы круглого сечения, у которых поверх слоя эмали наносится слой изоляции, состоящей из хлопчатобумажной, шелковой, лавсановой или стеклянной пряжи. Такая двойная изоляция проводов обеспечивает им повышенную механическую и электрическую прочность.

Провода с эмалево-волокнистой изоляцией широко применяют для изготовления обмоток электрических машин и аппаратов, в которых могут быть повышенные механические нагрузки на обмоточные провода, как в процессе изготовления обмоток, так и в процессе их эксплуатации. Основной сортамент проводов приведен в табл. 18.

Таблица 18. **Основной сортамент обмоточных проводов с эмалево-волокнистой изоляцией**

Марка провода	Диаметр жилы без изоляции	Наружный диаметр провода	Общая характеристика
ПЭВБД	0,69 – 2,1	0,90 – 2,4	Провод медный, изолированный высокопрочной эмалью и двумя слоями хлопчатобумажной пряжи
ПЭВШО	0,2 – 1,5	0,29 – 1,65	Провод медный, изолированный высокопрочной эмалью и одним слоем обмотки из натурального шелка
ПЭТЛО	0,2 – 1,3	0,33 – 1,5	Провод, изолированный лаком повышенной нагревостойкости и одним слоем обмотки из лавсанового волокна
ПЭТКСОТ	0,33 – 1,56	0,48 – 1,74	Провод, изолированный кремнийорганическим лаком и одним слоем обмотки из утоненного стекловолокна, пропитанной нагревостойким кремнийорганическим лаком

Наибольшей механической прочностью и сопротивлением на истирание обладает изоляция из лавсановых и капроновых волокон. Наиболее высокой нагревостойкостью обладает изоляция из стеклянной пряжи.

§ 36. Монтажные провода и кабели

Эти провода предназначаются для различного рода соединений в электрических аппаратах, приборах и других электротехнических устройствах. Токопроводящие жилы монтажных проводов и кабелей изготовляют лужеными из проводниковой меди.

Жилы могут быть однопроволочными – для фиксированного монтажа и многопроволочными – у проводов и кабелей для нефиксированного монтажа. Сечения жил у проводов от 0,05 до 2,5 мм^2, а у монтажных кабелей от 0,35 до 1,5 мм^2. Количество жил у кабеля от 1 до 52.

В монтажных проводах высокой нагревостойкости (200–250 °С) применяют никелированные медные жилы. Изоляция этих проводов состоит из фторопласта или фторопластовых лент в комбинации с оплеткой из стекловолокна. Наибольшее число марок монтажных проводов и кабелей предназначены для работы в интервале температур от –50 до +70 °С. Жилы этих проводов имеют гибкую влагостойкую пластмассовую изоляцию из полиэтилена или поливинилхлоридного пластиката.

В некоторых конструкциях монтажных проводов и кабелей поверх их основной изоляции наносится еще капроновая защитная оболочка. Эти провода и кабели применяют при напряжениях до 1000 В переменного или 1400 В постоянного тока.

Изготовляют также монтажные провода с волокнистой изоляцией из капроновых или стеклянных нитей. Эти провода могут работать при температуре от –80 до +105 °С, но в атмосфере с нормальной влажностью. Рабочие напряжения этих проводов: от 24 В (МГШ)* до 220 В (МШДЛ)**.

Выпускают еще монтажные провода с двойной изоляцией из волокнистой и пластмассовой (полиэтилен или пластикат поливинилхлоридный) изоляцией. Эти провода могут работать при температурах от –50 °С (изоляция из пластиката) и –60 °С (изоляция из полиэтилена) до +70 °С и при влажности до 98 % (не выше 40 °С). Рабочие напряжения проводов в зависимости от марки провода от 380 до 1000 В переменного тока или соответственно: до 500 и 1500 В постоянного тока.

§ 37. Установочные провода

Установочные провода применяют для распределения электрической энергии в силовых и осветительных сетях при неподвижной прокладке их внутри и вне помещений. Установочные провода выпускают с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами, которые могут быть однопроволочными и многопроволочными (гибкие).

---

* МГШ – многопроволочный в оплетке из капроновой нити.

** МШДЛ – однопроволочный с двойной обмоткой из капроновых нитей, лакированный.

Установочные провода могут иметь следующие виды изоляции из резины или гибких пластмасс (полиэтилен, пластикат поливинилхлоридный). У некоторых типов устано-

Таблица 19. **Установочные провода**

Марка провода	Сечение жилы, мм²	Основная характеристика	Область применения
ПР	0,75 – 120	Провод с медной однопроволочной жилой с резиновой изоляцией в пропитанной хлопчатобумажной оплетке	Для неподвижной прокладки внутри помещений (на роликах) и вне помещений (на изоляторах) в сетях напряжением до 660 В переменного тока
АПР	2,5 – 120	То же, но с алюминиевой однопроволочной жилой	То же
ПРГ	0,75 – 120	Провод гибкий с многопроволочной медной жилой с резиновой изоляцией в пропитанной хлопчатобумажной оплетке	»
ПРВ	1 – 10	То же, но в оболочках из поливинилхлоридного пластиката	То же, и в помещениях с повышенной влажностью
АПРВ	2,5 – 16	То же, но с алюминиевой жилой	То же
ПВ	0,5 – 95	Провод с медной однопроволочной жилой с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений в сетях напряжением до 380 В и до 660 В (в зависимости от толщины изоляции)
АПВ	2,5 – 120	То же, но с алюминиевой жилой	То же
ПГВ	0,5 – 95	Провод гибкий с многопроволочной медной жилой с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката	»
ПП	0,5 – 95	Провод с медной однопроволочной жилой с изоляцией из полиэтилена	»
АПП	2,5 – 120	То же, но с алюминиевой жилой	»
РКГМ	0,75 – 120	Провод гибкий с многопроволочной медной жилой с изоляцией из нагревостойкой кремнийорганической резины в оплетке из стеклянной пряжи, пропитанной лаком	Для выводов в электрических машинах и аппаратах нагревостойкого (180 °С) исполнения на напряжения до 660 В

вочных проводов основная резииовая изоляция заключеиа в оплетку из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом.

В зависимости от вида и толщины изоляции установочные провода изготовляют на напряжения 380 и 660 В переменного тока.

Интервал рабочих температур проводов с резиновой изоляцией: от −40 до +65 °С и от −40 до +85 °С (резины на основе бутилкаучука), проводов с пластмассовой изоляцией: от −50 до +70 °С и проводов с изоляцией из кремнийорганической резины: от −60 до +180 °С (провод РКГМ и др.). Основные представители этой группы проводов приведены в табл. 19*.

Толщина резиновой изоляции установочных проводов на напряжение 380 В составляет 0,6—0,8 мм, на напряжение 660 В — 1,2—1,8 мм в зависимости от сечения жилы провода. Толщина изоляции из поливинилхлоридного пластиката и полиэтилена у проводов на напряжение 380 В составляет 0,6—1,6 мм, на напряжение 660 В — 0,8—1,8 мм в зависимости от сечения токопроводящей жилы.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой обмоточные провода и на какие группы они делятся по виду их изоляции?
2. Какой вид изоляции обмоточных проводов обеспечивает им наибольшую иагревостойкость?
3. Что представляют собой монтажные провода и где они применяются?
4. Что представляют собой установочные провода и где они примеияются?
5. Какой вид изоляции установочных проводов обеспечивает им наибольшую холодостойкость?

ГЛАВА V. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 38. Основные свойства

По электрической проводимости полупроводники занимают промежуточное место между металлическими проводниками и диэлектриками. Так, удельное электрическое сопротивление

---

* Подробней об установочных проводах см.: Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. Высшая школа, 1982.

проводников $10^{-8}-10^{-6}$ Ом·м, полупроводников $10^{-6}-10^{+7}$ Ом·м, а диэлектриков $10^{+8}-10^{+18}$ Ом·м. У всех металлических проводников с повышением температуры электрическое сопротивление увеличивается, а у полупроводников и диэлектриков уменьшается.

У проводников имеется огромное количество свободных электронов, направленное перемещение которых составляет ток проводимости, а у полупроводников свободных электронов немного. Это объясняется тем, что валентные электроны в полупроводниках связаны со своими атомами, т. е. не являются свободными. Другой особенностью полупроводников является то, что ток в них может возникать и изменяться в широких пределах только под влиянием внешних воздействий: нагревания, облучения или при введении некоторых примесей. Все это увеличивает энергию валентных электронов, что позволяет им оторваться от своих атомов и под действием приложенного напряжения начать направленное перемещение, т. е. стать носителями тока.

Чем выше температура полупроводника или чем интенсивнее его облучение, тем больше будет в нем свободных электронов и тем больше будет сила тока в полупроводнике. Итак, во всех полупроводниках электрическая проводимость *электронная* или *n*-типа*, причем освободившиеся электроны принадлежат атомам самого полупроводника, поэтому такую электрическую проводимость называют собственной.

Атомы полупроводника, потерявшие электроны, превращаются в положительно заряженные ионы, которые закреплены на своих местах и не могут перемещаться. Место на внешней орбите атома, покинутое электроном, называется *дыркой*. Эту дырку (вакансию) может занять другой электрон, покинувший свое место в соседнем атоме. В результате такого перескока электрона у соседнего атома тоже появится дырка, т. е. он превратится в положительно заряженный ион.

Если к полупроводнику приложить электрическое напряжение, то электроны будут перескакивать с одних атомов на другие. При этом электроны перемещаются в одном направлении, а дырки возникают в противоположном. Дырку принято считать положительно заряженной частицей с зарядом, равным электрону. Кажущееся перемещение дырок в направлении, противоположном перемещению электронов, называется *дырочным током*. Электрическая проводимость полупроводника, обусловленная дырочным током, называется *дырочной*

---

* *n* – первая буква латинского слова «негативус», что означает отрицательный, так как электрон – отрицательно заряженная частица.

*электропроводимостью или электропроводимостью р-типа**.

Таким образом, перемещение электронов в одном направлении, а дырок в противоположном (рис. 24) определяет *собственную электрическую проводимость* полупроводника, поскольку носители тока (электроны и дырки) принадлежат собственным атомам полупроводника. В этом случае общий ток I складывается из электронного $I_э$ и дырочного $I_д$ токов, т. е.

$$I = I_э + I_д. \qquad (13)$$

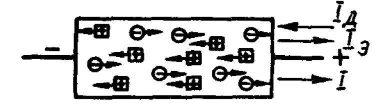


Рис. 24. Схема движения электронов и дырок в случае собственной электропроводности полупроводника

В случае собственной электрической проводимости полупроводника количества электронов $N_э$ и дырок $N_д$ равны. Но $I_э \cong I_д$, так как подвижность электрона больше подвижности дырки. Подвижность носителя тока есть отношение скорости перемещения электрона $v_э$ или скорости перемещения дырки $v_д$ к напряженности электрического поля E в полупроводнике. Тогда подвижность электрона $\mu_э = v_э/E$, подвижность дырки $\mu_д = v_д/E$. Таким образом, подвижность показывает, какой путь проходит за одну секунду электрон или дырка при напряженности $E = 1$ В/см. Учитывая изложенное, можно написать выражения для электронного и дырочного токов:

$$I_э = N_э e v_э = N_э e \mu_э E, \qquad (14)$$

$$I_д = N_д e v_д = N_д e \mu_д E, \qquad (15)$$

где e — заряд электрона или дырки; E — напряженность электрического поля.

Тогда общий ток в полупроводнике

$$I = I_э + I_д \text{ или } I = N_э e v_э + N_д e v_д = N_э e \mu_э E + N_д e \mu_д E. \qquad (16)$$

В случае собственной электрической проводимости полупроводника число электронов равно числу дырок, т. е.

$$N_э = N_д = N, \qquad (17)$$

тогда выражение (16) примет вид

$$I = Ne(\mu_э + \mu_д)E. \qquad (18)$$

* p — первая буква латинского слова «позитивус», что означает положительный, так как дырка определяет появление положительно заряженного иона.

Но очень часто требуются полупроводниковые материалы исключительно с электрической проводимостью *n*- или *p*-типа. Такие полупроводники нужны, например, для создания полупроводниковых выпрямителей. Это достигается внесением в тщательно очищенный * полупроводник соответствующей легирующей ** примеси.

Легирующие примеси, атомы которых снабжают полупроводник свободными электронами, называют *донорными, или донорами* ***. Атомы примесей, имеющие меньшую валентность, чем атомы полупроводника, обладают способностью присоединять к себе электроны. Такие примеси называют *акцепторными, или акцепторами* ****.

Чтобы получить полупроводник, обладающий только электронной электрической проводимостью, в него вводят вещество, состоящее из атомов, валентность которых на единицу больше валентности атомов основного полупроводника. Так, в германий Ge, состоящий из четырех валентных атомов, вводят донорную примесь – сурьму Sb или фосфор P, состоящую из пятивалентных атомов (рис. 25). Четыре электрона каждого из атомов введенной примеси устанавливают четыре ковалентные (парные) связи ***** с соответствующими атомами основного полупроводника, пятый электрон остается без такой связи. Следовательно, этот электрон может быть легко переведен в свободное состояние и под действием приложенного напряжения примет участие в образовании электронного тока в полупроводнике (рис. 26).

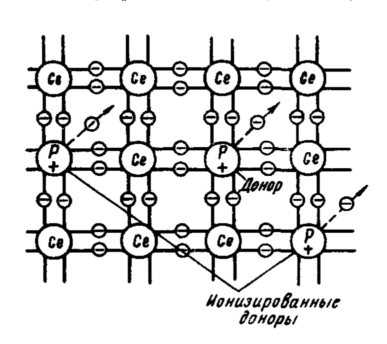
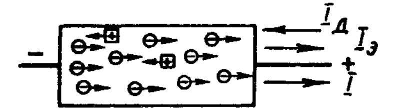


Рис. 25. Кристаллическая решетка германия с введенной в него донориой примесью (фосфором)

Рис. 26. Схема движения электронов и дырок в полупроводнике с донорной примесью



* В тщательно очищенном полупроводниковом материале примеси составляют не более 10^{-11}%.

** От латинского слова «лиго» – связываю, соединяю.

*** От латинского слова «донаре» – дарить, отдавать.

**** От латинского слова «акцептаре» – получать, брать.

***** Ковалентные связи принято изображать двойными линиями, соединяющими атомы друг с другом (рис. 25 и 27).

На рисунке видно, что основными носителями тока являются электроны, составляющие примесную электрическую проводимость. Две дырки и соответствующие им два электрона получены в результате ионизации атомов германия. Эти носители тока обусловливают собственную электрическую проводимость полупроводника. Общий ток в полупроводнике равен сумме электронного и дырочного токов, но электронный ток во много раз больше дырочного.

Если же в германий ввести какую-либо акцепторную примесь, например бор В, то каждый из атомов примеси установит три ковалентные связи с соседними атомами германия. Но так как у бора всего три валентных электрона, то он может установить связи только с тремя ближайшими атомами германия. Для связи с четвертым атомом германия у атома бора нет электрона. Таким образом, у нескольких атомов германия будет по одному электрону без ковалентной связи. Достаточно теперь небольших внешних энергетических воздействий, чтобы эти электроны покинули свои места, образовав дырки у атома германия (рис. 27). Освободившиеся электроны (*2*, *4* и *6*) атомов германия присоединятся теперь к атомам бора и поэтому они не могут создать ток в полупроводнике. Образовавшиеся же дырки *1*, *3* и *5* у атомов германия позволяют перейти на них электронам из соседних атомов, где, в свою очередь, возникнут новые дырки.

Таким образом, каждая возникшая положительно заряженная дырка будет переходить от одного атома германия к другому, от него к следующему и т. д. Под действием приложенного напряжения это движение дырок упорядочится, т. е. в полупроводнике возникнет примесный дырочный ток.

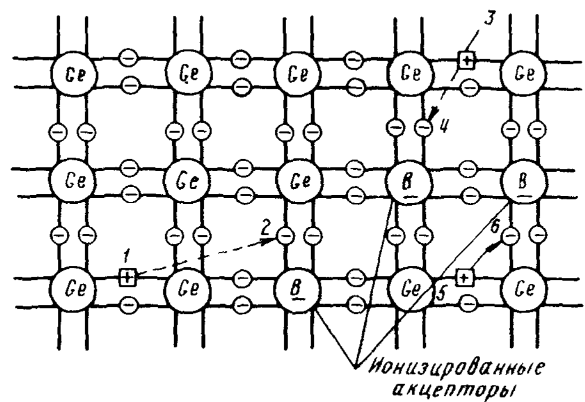


Рис. 27. Кристаллическая решетка германия с введенной в него акцепторной примесью (бором)

Кроме того, в полупроводнике будет еще небольшое количество пар свободных электронов и дырок от атомов германия. Следовательно, наряду с примесной электрической проводимостью в полупроводнике будет небольшая собственная электрическая проводимость. Общий ток в полупроводнике попрежнему будет равен сумме электронного и дырочного токов. Но дырочный ток будет значительно больше электронного. На рис. 28 показана схема движения дырок и электронов в полупроводнике с акцепторной примесью. Из рисунка видно, что положительно заряженных частиц (дырок) значительно больше, чем электронов. Рассмотренные примеры показывают, что примеси значительно увеличивают электрическую проводимость полупроводников.

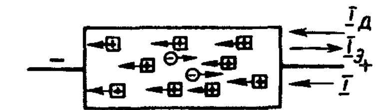


Рис. 28. Схема движения дырок и электронов в полупроводнике с акцепторной примесью

Под действием приложенного напряжения электроны и дырки при перемещении в полупроводнике встречают различного рода препятствия. При этом они теряют часть энергии и отклоняются от своего пути, т. е. происходит рассеяние носителей тока. Оно вызвано главным образом различными загрязняющими примесями. Чем чище полупроводник, тем меньше рассеяние носителей тока и тем выше подвижность электронов и дырок, а следовательно, тем большей проводимостью γ обладает полупроводник.

С повышением температуры проводимость всех полупроводников возрастает (рис. 29). Проводимость будет расти тем интенсивней, чем больше донорной или акцепторной примеси введено в полупроводник.

До температуры T_1 в полупроводнике наблюдается примесная электрическая проводимость, обусловленная движением зарядов примеси. В интервале температур $T_1 - T_2$ проводимость полупроводника несколько уменьшается. Это вызвано интенсивными тепловыми колебаниями его атомов, которые мешают перемещению свободных электронов и дырок. При дальнейшем же повышении температуры в полупроводнике развивается собственная электрическая проводимость. В связи с этим возникает большое количество новых электронов и дырок, направленное перемещение которых создает все возрастающий ток в полупроводнике. В связи с этим удельная проводимость полупроводника резко возрастает.

Кривая *2* не показывает уменьшения проводимости высоко-

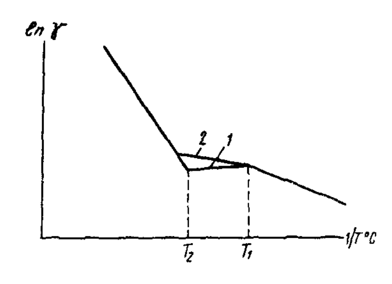


Рис. 29. Зависимость удельной проводимости полупроводника от температуры:

1 – при малой концентрации легирующей примеси, 2 – при большой концентрации легирующей примеси

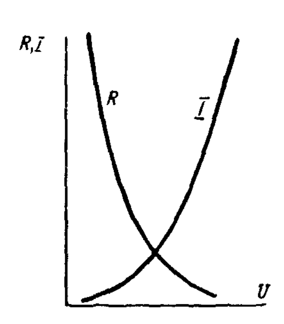


Рис. 30 Зависимость тока и сопротивления полупроводника от приложенного напряжения

легированного полупроводника в интервале температур $T_1 - T_2$. Это объясняется большим количеством поступающих в полупроводник примесных электронов и дырок. Участие этих примесных носителей тока вполне компенсирует возрастание сопротивления полупроводника в этом интервале температур. При температуре абсолютного нуля (–273 °С) электроны не обладают подвижностью, т. е. они прочно связаны со своими атомами. Вследствие этого при абсолютном нуле полупроводники становятся диэлектриками.

Характерным свойством полупроводников является нелинейность зависимости тока в полупроводнике от приложенного напряжения (рис. 30), т. е. ток растет значительно быстрее, чем напряжение. Одновременно с ростом тока резко уменьшается электрическое сопротивление полупроводника. Это свойство используется в вентильных полупроводниковых разрядниках. Они присоединяются к проводам линий электропередачи (рис. 31) для защиты их от больших токов при ударе молнии. При нормальном напряжении ток с линии передачи на землю разрядник не пропускает вследствие очень большого его сопротивления. При ударе же молнии провода будут находиться под воздействием очень большого напряжения и электрическое сопротивление вентильного разрядника резко уменьшится. В связи с этим разрядник отведет большой ток с линии на землю, в результате чего напряжение линии электропередачи снизится до нормального значения. Большое сопротивление разрядника снова восстановится и ток с линии на землю им пропускаться не будет.

При изменении напряжения с U на $-U$ ток в полу-

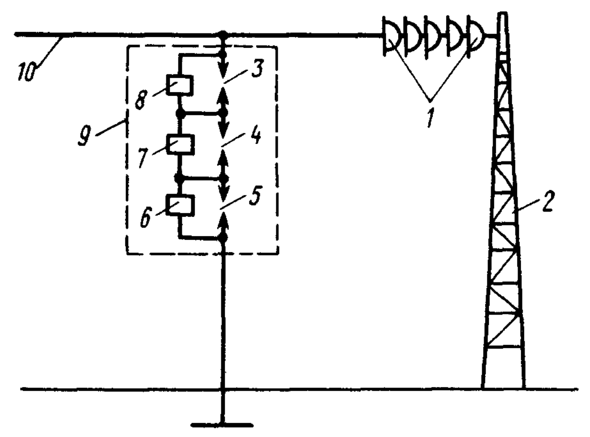


Рис. 31. Схема подключения вентильного полупроводникового разрядника к линии электропередачи:

1 — изоляторы, 2 — мачта, 3, 4, 5 — воздушные промежутки в разряднике, 6, 7, 8 — полупроводниковые нелинейные элементы, 9 — корпус разрядника (фарфор), 10 — провод линии электропередачи

проводнике пойдет в обратном направлении и будет изменяться по такому же закону (рис. 32). Это значит, что полупроводник имеет *симметричную вольтамперную характеристику.*

Если же взять два полупроводника, находящихся в плотном контакте друг с другом, причем один из полупроводников обладает электропроводностью *n*-типа, а другой — *p*-типа, то такая система будет иметь *несимметричную вольтамперную характеристику* (рис. 33). При прохождении

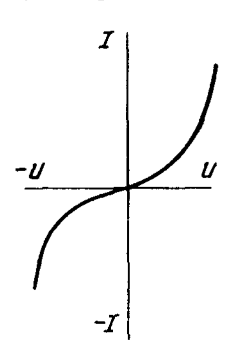


Рис. 32. Симметричная вольтамперная характеристика полупроводника

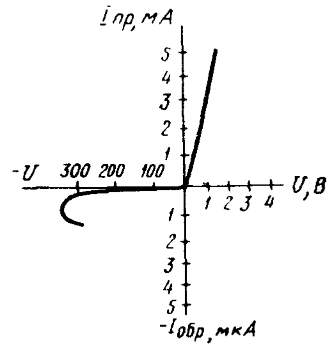


Рис. 33. Несимметричная вольтамперная характеристика двух полупроводников

тока в одном направлении система двух полупроводников будет обладать очень малым сопротивлением, а при прохождении тока в обратном направлении – очень большим. В системе двух полупроводников с различными типами электрической проводимости ток, проходящий в разных направлениях, будет иметь разную величину. При этом прямой ток $I_{пр}$ быстро возрастает с ростом приложенного напряжения. Когда же к этой системе приложено напряжение $-U$, то вначале через эту систему ток обратного направления ($I_{обр}$) практически не проходит. При повышении обратного напряжения появляется очень небольшой обратный ток.

Таким образом, система двух полупроводников с различного типа электрической проводимостью ток обратного направления не пропускает. Это свойство полупроводников широко используют в полупроводниковых выпрямителях. При приложении же к такой системе двух полупроводников очень большого обратного напряжения в месте их соприкосновения происходит электрический пробой за счет резкого уменьшения сопротивления.

Место плотного соприкосновения двух полупроводников с различного типа электрической проводимостью, называемое *p-n-переходом*, обладает свойством выпрямления переменного тока. При приложении к системе двух полупроводников переменного напряжения *p-n*-переход будет пропускать ток только одной полуволны напряжения. Это можно объяснить следующим образом. Когда к системе двух полупроводников не приложено внешнее напряжение, то в полупроводнике *n*-типа имеется большая концентрация электронов, а в полупроводнике *p*-типа – большая концентрация дырок. Кроме того, в обоих полупроводниках имеются в небольшом количестве неосновные носители тока. Так, в полупроводнике *n*-типа содержится небольшое количество дырок, а в полупроводнике *p*-типа – некоторое количество электронов.

При плотном контакте этих двух полупроводников, осуществляемом, например, вплавлением одного полупроводника в другой, электроны из полупроводника *n*-типа будут диффундировать в полупроводник *p*-типа, где их концентрация очень мала. Одновременно дырки из *p*-полупроводника будут диффундировать в *n*-полупроводник, где их концентрация тоже очень мала. Эта взаимная диффузия дырок и электронов уменьшит концентрацию электронов в пограничном слое в *n*-полупроводнике и заполнит его дырками. При этом уменьшится концентрация дырок в пограничном слое *p*-полупроводника; этот слой заполнится электронами (рис. 34).

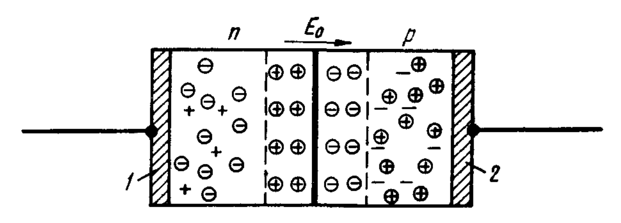


Рис 34 Схема образования *p-n*-перехода двух полупроводников

Таким образом, еще до подачи к электродам *1* и *2* внешнего напряжения на границе двух полупроводников создается двойной электрический слой. В результате этого здесь возникает местное электрическое поле с напряженностью E_0, которое направлено в сторону отрицательных зарядов в двойном электрическом слое.

При приложении к системе двух полупроводников внешнего напряжения, как показано на рис. 35, когда напряженность $E_{вн}$ внешнего источника будет совпадать с напряженностью E_0 местного поля, электроны в *n*-полупроводнике и дырки в *p*-полупроводнике будут перемещаться в сторону электродов *1* и *2*. В результате этого в *p-n*-переходе области электронов в *p*-полупроводнике и дырок в *n*-полупроводнике будут расширяться. Следовательно, электрическое сопротивление *p-n*-перехода сильно возрастет, т. е. создается запирающий слой и ток *p-n*-переходом пропускаться не будет. Фактически же будет проходить ток весьма малой величины, вызванный перемещением случайных носителей тока. Этот ток называется *обратным*.

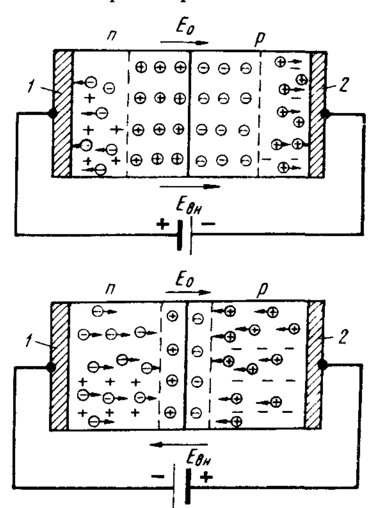


Рис. 35. Схемы работы *p-n*-перехода двух полупроводников (плоскостной диод) при приложении к ним напряжения в обратном (сверху) и прямом (снизу) направлениях

В случае же, когда $E_{вн}$ будет направлена против E_0, местное поле будет заметно ослаблено, и электроны в *n*-полупроводнике и дырки в *p*-полупроводнике начнут перемещаться в область *p-n*-перехода. В результате этого запирающий слой сузится,

а его электрическое сопротивление резко уменьшится. В этом случае *p-n*-переход будет пропускать ток. Этот ток называется *прямым*, а направление тока — *прямым*, или *пропускным*.

Прямой ток во много раз больше обратного. Как было сказано выше, работа полупроводникового выпрямителя оценивается его вольтамперной характеристикой (см. рис. 33). Она показывает, что при малых величинах напряжения прямой ток, пропускаемый выпрямителем, достигает больших значений. При приложении же к выпрямителю обратного напряжения, когда плюс батареи присоединен к *n*-полупроводнику, а минус — к *p*-полупроводнику, выпрямитель практически тока не пропускает. Начиная с 300 В (см. рис. 33) обратного напряжения, *p-n*-переход станет пропускать очень малые величины обратного тока. Если же обратное напряжение увеличивать, то обратный ток с некоторого момента начнет сильно возрастать и может достигнуть такой величины, при которой произойдет пробой *p-n*-перехода.

В полупроводниковых диодах *p-n*-переход может быть выполнен или в виде сплавного контакта между двумя полупроводниками с разного типа электропроводностями, или в виде контакта между пластинкой полупроводника и металлическим острием. В первом случае образуется некоторая площадь соприкосновения (контакт) двух полупроводников. Такие диоды называются *плоскостными*. Во втором случае пластинка полупроводника (германия или кремния) размером 2×2 мм соприкасается с острием металлической тонкой проволоки. Такие диоды называются *точечными*. Они обладают очень малой емкостью *p-n*-перехода и применяются на высоких частотах.

Познакомимся теперь с некоторыми специфическими свойствами полупроводников.

Под действием света проводимость некоторых полупроводников (например, селена) может резко изменяться. Это вызывается тем, что световое излучение с определенной длиной волны сообщает электронам полупроводника энергию, достаточную для того, чтобы они сделались свободными. При этом сопротивление полупроводника резко уменьшается. Это свойство полупроводников используют при создании фоторезисторов — приборов, чувствительных не только к видимому участку спектра, но и к инфракрасному излучению.

При частичном освещении полупроводника, когда на его поверхности имеются освещенная и неосвещенная области, между ними возникает фото-эдс. Это явление используют при создании источников электрической энергии: фотоэлемен-

тов и солнечных батарей. Последние способны превращать солнечную энергию непосредственно в электрическую.

Некоторые полупроводники (например, кремний) резко изменяют свое электрическое сопротивление под действием оказываемого на них давления (тензорезистивный эффект). Это свойство полупроводников используют при изготовлении из них чувствительных измерителей давления – тензодатчиков.

То, что у полупроводников имеется два участка с разными температурами, вызывает перемещение свободных зарядов из нагретого участка в холодный. Так, если носителями тока являются электроны, то они, перемещаясь в холодный участок, зарядят его отрицательным электричеством. Нагретый участок полупроводника, потеряв часть электронов, зарядится положительно. В результате этого между нагретым и холодным участками полупроводника возникает термо-эдс. Это явление используется при создании термоэлементов и термогенераторов, которые способны превращать тепловую энергию в электрическую.

§ 39. Полупроводниковые материалы

Из большого количества полупроводниковых материалов неорганического и органического происхождения монокристаллической и поликристаллической структуры в электротехнике применяют главным образом германий, кремний, селен и карбид кремния. Они широко используются в производстве полупроводниковых приборов.

Кремний и германий относятся к алмазоподобным полупроводникам, так как они имеют кристаллическую структуру алмаза (рис. 36). Это куб, в вершинах и в центрах граней которого расположены атомы углерода. Кроме того, атомы углерода находятся в центрах четырех (из восьми) малых кубов (октантов), на которые делится большой куб.

Рис. 36 Кристаллическая структура алмазного типа

На рис. 25 и 27 было показано плоскостное изображение кубической структуры германия. Из этих рисунков видно, что в структуре алмазного типа каждый из рассматриваемых атомов (германия или кремния) окружен четырьмя такими же атомами,

расположенными на одинаковом расстоянии от рассматриваемого, каждый из атомов образует ковалентную связь с соседним атомом.

Германий (Ge) – элемент четвертой группы периодической системы Менделеева. Исходными сырьевыми материалами для его получения служат цинковые и сульфидные руды. В результате сложных химических процессов получают слиток германия, но его еще нельзя применить для изготовления полупроводниковых приборов, так как он содержит примеси и не является монокристаллом. Сначала этот слиток освобождают от примесей методом зонной плавки. В очищенном германии примеси должны составлять не более $5 \cdot 10^{-9}$ %.

Чтобы получить монокристаллический германий, его расплавляют в вакууме или атмосфере инертного газа. Для получения германия с электрической проводимостью *n*- или *p*-типа в расплав очищенного германия вводят соответственно донорную или акцепторную примесь. Затем из расплава вытягивают с определенной скоростью чистый монокристаллический германий в виде сплошного цилиндра заданного диаметра *. Германий имеет ярко-серебристый цвет, плотность 5322 кг/м^3 и температуру плавления 937,2 °С. Очищенный нелегированный германий обладает следующими электрическими характеристиками: удельное электрическое сопротивление $\rho \cong 0,5$ Ом · м; $\varepsilon = 16,3$. У легированных сортов германия с электрической проводимостью *n*-типа $\rho = 0,008 \div 0,3$ Ом · м, с электрической проводимостью *p*-типа $\rho = 0,01 - 0,06$ Ом · м. Все сорта германия обладают большой твердостью и хрупкостью.

Германий широко применяют для изготовления диодов и фотоэлементов.

Кремний (Si) является элементом четвертой группы периодической системы Менделеева. Он широко распространен в природе в виде кремнезема (SiO_2), который служит одним из исходных веществ для получения технических сортов кремния.

В результате очистки слитков кремния методом зонной плавки получают монокристаллический кремний с электропроводимостью *n*- или *p*-типа в зависимости от введенных легирующих примесей. В очищенном кремнии примеси должны составлять не более 10^{-11} %.

Образцы полированного кремния имеют цвет стали. Кремний, так же как и германий, представляет собой хрупкий материал. Основные характеристики очищенного нелегирован-

* Получение расплава монокристаллов германия и кремния производится по методу Чохральского.

ного кремния: плотность 2330 кг/м^3; температура плавления 1417 °С; $\rho = 2{,}30$ Ом·м; $\varepsilon = 11{,}7$. У легированных сортов кремния с электропроводимостью *n*-типа $\rho = 0{,}003 \div 2$ Ом·м; с электропроводимостью *p*-типа $\rho = 0{,}06 \div 50$ Ом·м.

Кремний применяют более широко, чем германий, так как верхний предел рабочей температуры полупроводниковых приборов на основе кремния 180–200 °С, а на основе германия 80–100 °С. Кроме того, его используют в интегральных полупроводниковых схемах в радиоэлектронике.

Селен (Se) – элемент шестой группы периодической системы Менделеева. Исходными материалами для его получения являются остатки, получающиеся при электролитическом рафинировании меди. Твердый селен может иметь аморфное или кристаллическое строение. Черный аморфный селен получают из очищенного расплавленного селена при быстром охлаждении его до комнатной температуры. Он представляет собой диэлектрик с удельным сопротивлением $\rho = 10^{11}$ Ом·м.

Серый кристаллический селен получают из расплавленного аморфного селена при медленном охлаждении его от температуры плавления (220 °С) до комнатной. Кристаллический селен является примесным полупроводником *p*-типа с $\rho = 10^3$ Ом·м, имеющим поликристаллическую структуру. Основные характеристики селена: плотность 4800 кг/м^3; температура плавления 217 °С; $\rho = (0{,}8 \div 5) \cdot 10^3$ Ом·м; $\varepsilon = 6{,}3$. Интервал рабочих температур селена в выпрямителях от –60 до 75 °С.

Селен применяют для изготовления селеновых выпрямителей, фотоэлементов и фоторезисторов.

Карбид кремния (SiC) представляет собой хрупкий материал поликристаллического строения с ярко выраженной нелинейной зависимостью между током и напряжением (см. рис. 30). Он образуется в результате химического соединения кремния и углерода. Исходными материалами для его получения являются чистый кварцевый песок и каменный уголь. Чтобы получить примесную электрическую проводимость того или другого типа, в исходный состав (шихту) вводят примеси – фосфор, сурьму, висмут, магний, алюминий и др. Реакция образования карбида кремния ведется при конечной температуре приблизительно 2000 °С.

Карбид кремния, легированный фосфором, сурьмой или висмутом, имеет темно-зеленую окраску и обладает электропроводностью *n*-типа; легированный же галлием, алюминием или бором, имеет темно-фиолетовую окраску и обладает электрической проводимостью *p*-типа. Основные характеристи-

ки карбида кремния: плотность 3200 кг/м^3; температура плавления 2700 °С; $\rho = 10^2 - 10^5$ Ом·м; $\varepsilon = 6{,}5 \div 7{,}5$. Как и кристаллический селен, карбид кремния является примесным полупроводником, но при температуре 1400 °С и выше у него появляется собственная электропроводность.

Основной областью применения наиболее чистых сортов карбида кремния является производство варисторов, обладающих нелинейной симметричной вольтамперной характеристикой и могущих работать в интервале температур от −50 до +80 °С. Варисторы используют в устройствах автоматического регулирования.

Из поликристаллического карбида кремния могут быть получены методом возгонки в инертном газе монокристаллы карбида кремния, отличающиеся химической чистотой. Они широко используются для изготовления диодов и транзисторов на рабочие температуры до 700 °С, а также для производства светодиодов.

Такие внешние воздействия, как влага и фоновые (радиационные) излучения, в значительной степени ухудшают характеристики полупроводниковых приборов. Поэтому для защиты от внешних воздействий их заключают в герметические металлические, керамические или пластмассовые корпуса.

Контрольные вопросы

1. Перечислите характерные свойства полупроводников.
2. Что представляют собой собственная и примесная электропроводности полупроводников?
3. Что такое *p-n*-переход?
4. Каковы структура и основные свойства германия и кремния?
5. Каковы структура и основные свойства селена?
6. Каковы состав и основные свойства карбида кремния?
7. В производстве каких приборов применяют полупроводниковые материалы?

ГЛАВА VI. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 40. Основные характеристики

Магнитными называются такие материалы, которые под действием внешнего магнитного поля способны намагничиваться, т. е. приобретать особые магнитные свойства.

Основные магнитные материалы — это железо, никель, кобальт и различные сплавы на основе технически чистого железа. Свойства магнитных материалов оценивают с по-

мощью величин, называемых *магнитными характеристиками.* Важнейшими магнитными характеристиками являются следующие.

Магнитная проницаемость (относительная магнитная проницаемость) μ. Это величина безразмерная. Она входит в выражение абсолютной магнитной проницаемости, Гн/м,

$$\mu_а = \mu_0\mu, \qquad (19)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $1{,}256637 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Магнитная проницаемость – величина, определяющая способность материала к намагничиванию. Чем больше величина μ, тем легче намагничивается материал, и наоборот, чем меньше величина μ, тем в меньшей степени он может быть намагничен. Магнитная проницаемость в большой степени зависит от напряженности H, действующей в материале (рис. 37). Поэтому для оценки способности материала к намагничиванию приходится учитывать начальную магнитиую проницаемость $\mu_н$ и максимальную магнитную проницаемость $\mu_м$

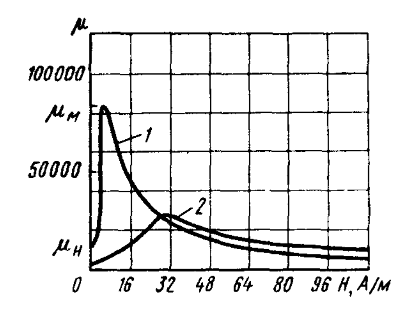


Рис. 37. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля:

1 – пермаллой, *2* – чистое железо (Fe = 99,98 %)

Рис 38 Начальная кривая намагничивания (1) и петля гистерезиса (2)

Чем выше значения этих характеристик у данного материала, тем легче он намагничивается. Всякий магнитный материал обладает магнитными свойствами только до определенной температуры (температура Кюри $\theta_к$), по достижении которой магнитные свойства у материала исчезают, т. е. он не может быть намагничен. Это обусловлено дезориентацией внутренних областей (доменов) намагничивания из-за интенсивного теплового движения его атомов и молекул. У некоторых ферритов магнитные свойства исчезают

при $\theta_к = 45$ °С, но есть материалы, у которых $\theta_к = 1131$ °С (кобальт).

Индукция насыщения B_s. Поведение магнитного материала в магнитном поле характеризуется начальной кривой намагничивания (рис. 38). Эта кривая показывает изменение магнитной индукции B в магнитном материале в зависимости от напряженности H. Из рассмотрения кривой следует, что магнитная индукция вначале растет, затем ее рост замедляется, а по достижении индукции B_s она остается постоянной. Говорят, что магнитный материал достиг насыщения, а индукцию B_s называют *индукцией насыщения*. Чем больше величина B_s, тем выше свойства магнитного материала. Магнитная индукция измеряется в тесла (Тл).

Остаточная магнитная индукция B_r **и коэрцитивная сила** H_c. Если образец магнитного материала намагничивать, непрерывно повышая напряженность магнитного поля H, то магнитная индукция B тоже будет непрерывно возрастать по кривой намагничивания. Эта кривая начинается в точке 0 (рис. 38) и заканчивается в точке, соответствующей индукции насыщения B_s. При уменьшении напряженности H магнитная индукция будет также уменьшаться, но начиная с величины B_u значения индукции не будут совпадать со значениями этой характеристики на начальной кривой намагничивания, и, когда напряженность магнитного поля становится равной нулю, в образце магнитного материала будет обнаруживаться *остаточная магнитная индукция* B_r. Для размагничивания образца материала надо, чтобы напряженность магнитного поля изменила свое направление на обратное $(-H)$. Напряженность поля H_c, при которой индукция становится равной нулю, называется *коэрцитивной силой*.

Если после этого образец магнитного материала намагничивать далее в противоположном направлении, то в материале снова будет наблюдаться индукция насыщения $(-B_s)$. При дальнейшем уменьшении напряженности магнитного поля до величины $H = 0$ и новом намагничивании в первоначальном направлении индукция будет непрерывно увеличиваться до величины индукции насыщения B_s. В результате образуется замкнутая петля, которую называют *предельной*, или *статической, петлей гистерезиса*. Предельная петля гистерезиса снимается при медленном изменении постоянного магнитного поля от $+H$ до $-H$, когда величина магнитной индукции становится равной индукции насыщения B_s.

Коэффициент прямоугольности $\alpha_п$ гистерезисной петли характеризует степень прямоугольности предельной гистерезисной петли (рис. 38) и вычисляется по формуле

$$\alpha_п = B_r/B_м.$$

Чем больше величина $\alpha_п$, тем более прямоугольна гистерезисная петля. У магнитных материалов, применяемых для запоминающих устройств в электронных вычислительных машинах, $\alpha_п = 0,98$, а у других материалов он значительно меньше.

До сих пор мы рассматривали намагничивание материалов в постоянном магнитном поле. При воздействии на материал переменного магнитного поля получают динамическую кривую намагничивания и динамическую петлю гистерезиса. Отношение значения индукции к величине магнитного поля на динамической кривой представляет собой *динамическую магнитную проницаемость*

$$\tilde{\mu} = B_{ампл}/H_{ампл}.$$

При низких частотах и малой толщине магнитного материала динамическая кривая намагничивания совпадает со статической кривой. При этом значения динамической магнитной проницаемости практически совпадают со значениями проницаемости, вычисленными по статической кривой намагничивания. Динамическая петля гистерезиса имеет несколько бо́льшую площадь, чем статическая петля, так как при воздействии переменного магнитного поля в материале возникают, кроме потерь на гистерезис, потери на вихревые токи и на магнитное последействие.

Потери энергии на вихревые токи $P_в$ зависят от удельного электрического сопротивления ρ магнитного материала. Чем оно больше, тем меньше потери на вихревые токи. Потери на вихревые токи, Вт/кг, пропорциональны квадратам магнитной индукции $B_м$ и частоты f^2 переменного магнитного поля. Так, для листового магнитного материала потери в переменном поле подсчитывают согласно выражению

$$P_в = 164 \cdot h^2 B_м^2 f^2/\gamma\rho, \qquad (20)$$

где h – толщина листа, м; $B_м$ – максимальное значение магнитной индукции, Тл; f – частота, Гц; γ – плотность материала, кг/м^3; ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом · м.

Удельная объемная энергия W. Если из рассмотренной ранее петли гистерезиса выделить левую верхнюю часть (рис. 39), а в правой части откладывать значения, равные половине произведения магнитной индукции на соответствующую ей напряженность, то получим кривую A удельной объемной энергии. Это величина энергии, создаваемой по-

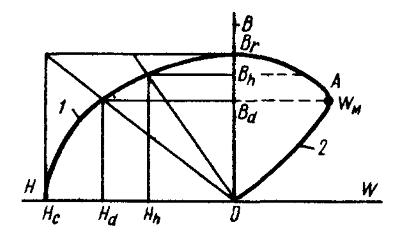


Рис. 39. Кривая размагничивания (1) и кривая удельной объемной магнитной энергии (2) разомкнутого магнита

стоянным магнитом в воздушном зазоре (между его полюсами), отнесенная к единице его объема, Дж/м^3.

Магнитной характеристикой материала является максимальная величина удельной объемной энергии, Дж/м^3,

$$W_м = B_d H_d / 2, \quad (21)$$

где B_d – индукция, соответствующая максимальному значению удельной объемной энергии; H_d – напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению удельной объемной энергии.

§ 41. Классификация магнитных материалов

Согласно поведению в магнитном поле все магнитные материалы делят на две основные группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы обладают большими значениями начальной и максимальной магнитной проницаемости и малыми значениями коэрцитивной силы ($H_c \leqslant 40$ А/м). Эти материалы легко намагничиваются и размагничиваются. Они отличаются малыми потерями на гистерезис, т. е. им соответствует узкая гистерезисная петля.

Уровень магнитных характеристик магнитно-мягких материалов зависит от их химической чистоты и степени искажения их кристаллической структуры. Чем меньше различных примесей в магнитно-мягком материале, тем выше уровень его характеристик, т. е. тем больше $\mu_н$ и $\mu_м$ и тем меньше H_c и потери на гистерезис. Поэтому при производстве магнитно-мягких материалов стараются удалить из них наиболее вредные примеси – углерод C, фосфор P, серу S, кислород O_2, азот N_2 и различные окислы. Одновременно стараются не искажать кристаллическую структуру материала и не вызывать в нем внутренних напряжений. Из магнитно-мягких материалов изготовляют сердечники электрических машин, трансформаторов, реле и других электрических аппаратов.

Магнитно-твердые материалы обладают большой коэрцитивной силой ($H_c \geqslant 40$ А/м) и большой остаточной индукцией ($B_r \geqslant 0{,}1$ Тл). Им соответствует широкая гистерезисная петля. Эти материалы с большим трудом намагничиваются, а будучи намагниченными, могут несколько лет сохранять магнитную энергию, т. е. служить источниками постоянного магнитного поля. Магнитно-твердые материалы применяют главным образом для изготовления постоянных магнитов.

По составу все магнитные материалы делятся на металлические и неметаллические. К металлическим магнитным материалам относят чистые металлы (железо, кобальт, никель) и магнитные сплавы некоторых металлов, к неметаллическим — ферриты.

§ 42. Металлические магнитно-мягкие материалы

Основными металлическими магнитно-мягкими материалами, применяемыми в электротехнике, являются пермаллои, альсиферы и низкоуглеродистые кремнистые стали.

Пермаллои — пластичные железоникелевые сплавы с содержанием никеля от 36 до 80 %. С целью улучшения тех или иных свойств в них вводят молибден, хром или медь, получая легированные пермаллои. Пермаллои, содержащие 36—50 % никеля, называются низконикелевыми, а 60—80 % — высоконикелевыми.

Все пермаллои отличаются высоким уровнем магнитных характеристик (табл. 20 и 21). Это обеспечивается не только их составом и химической чистотой сплава, а также специальной тепловой обработкой. Она заключается в нагреве со скоростью 400—500 °С в час, выдержке сплава при 1000—1150 °С в течение 3—6 ч и последующем охлаждении со скоростью 100—200 °С в час до комнатной температуры. Некоторым пермаллоям необходим повторный нагрев до 600 °С и быстрое охлаждение со скоростью 150 °С в минуту.

Таблица 20. **Основные характеристики нелегированных пермаллоев**

Содержание никеля, %	$\mu_н$	$\mu_м$	H_c, А/м	ρ, мкОм м
78,5	10000—14000	130000—220000	1—3	0,25
66	3000—4000	120000—200000	3—5	0,32
50	2000—3000	50000—70000	6—9	0,45

Таблица 21. **Основные характеристики легированных пермаллоев**

Содержание никеля, %	Содержание легирующих элементов, %	$\mu_н$	$\mu_м$	H_c, А/м	ρ, мкОм·м
78,5	3,8 Mo	25000	150000	1,0	0,55
68	2 Mo	7000	120000	0,7	0,48
50	4 Cr	3000	30000	8	0,95

Лучшие магнитные характеристики пермаллоев достигаются при отжиге их в вакууме.

Из табл. 20 и 21 следует, что наибольшими значениями удельного электрического сопротивления, а следовательно, малыми потерями на вихревые токи обладают легированные пермаллои. Эти пермаллои обладают также повышенными значениями магнитных характеристик.

Все виды пермаллоев чувствительны к механическим деформациям материала: наклепу при резке, штамповке и другим механическим воздействиям. Поэтому детали из пермаллоя, полученные такими способами, подвергают дополнительной тепловой обработке – отжигу.

Пермаллои поставляют в виде лент толщиной 0,002–0,5 мм, листов толщиной 1–2 мм и прутков диаметром 5–50 мм и более. Низконикелевые пермаллои применяют для изготовления сердечников дросселей, малогабаритных трансформаторов и магнитных усилителей, высоконикелевые – деталей аппаратуры, работающих на частотах несколько выше звуковых. Магнитные характеристики пермаллоев стабильны в интервале температур от −60 до +60 °С.

Альсиферы представляют собой нековкие хрупкие сплавы, состоящие из 5,5–13 % алюминия, 9–10 % кремния, остальное железо. Промышленные сорта альсифера имеют следующие характеристики: $\mu_н = 6000 \div 7000$; $\mu_м = 30\,000 \div 35\,000$; $H_c = 2{,}2$ А/м; $\rho = 0{,}8$ мкОм·м. Альсиферы предназначались для замены дорогих пермаллоев, но они заменили пермаллои в сравнительно ограниченной области применения. Из альсифера изготовляют литые сердечники, работающие в диапазоне частот не более 20кГц, так как на более высоких частотах в них возникают большие потери на вихревые токи. Из альсифера отливают полые детали с толщиной стенок не менее 2 мм.

Электротехнические кремнистые стали представляют собой низкоуглеродистые стали*, в которые вводят от 0,8 до 4,8 %

* В электротехнических сталях содержание углерода не превышает 0,04 % мас.

кремния с целью улучшения магнитных свойств стали. Кремний, находящийся в стали в растворенном состоянии, реагирует с закисью железа FeO. При этом из стали выделяется чистое железо и образуется кремнезем $2FeO + Si \rightarrow 2Fe + SiO_2$.

Кремнезем повышает удельное сопротивление стали, что снижает потери на вихревые токи Кремний вызывает распад цементита Fe_3C – вредной примеси в стали, резко понижающей ее магнитные характеристики. Кремний также способствует росту кристаллов железа, что повышает уровень магнитных характеристик стали. Введение больших количеств кремния в сталь улучшает все магнитные характеристики, но вызывает ее повышенную хрупкость, исключающую изготовление из нее штампованных деталей. Поэтому в сталь вводят кремний в количестве, не превышающем 4,8 %.

Листы кремнистой стали изготовляют прокаткой заготовок в нагретом или ненагретом состоянии, поэтому различают горячекатаную и холоднокатаную кремнистую сталь. Как известно, железо имеет кубическую структуру кристаллов. Оно намагничивается наиболее интенсивно, когда направление магнитного поля совпадает с направлением ребра куба кристалла. Поэтому для улучшения магнитных свойств листы электротехнической стали прокатывают в холодном состоянии в одном и том же направлении, после чего отжигают в атмосфере водорода при 900 С. При прокатке листов стали в одном и том же направлении кристаллы железа ориентированы преимущественно в направлении прокатки. При последующем отжиге из листов стали удаляются примеси, снижающие магнитные свойства материала (углерод, кислород), кроме того, деформированные прокаткой кристаллы железа принимают прежнюю форму.

Холоднокатаные кремнистые стали, у которых кристаллы железа расположены преимущественно в направлении прокатки, называются текстурованными*. Преимущества холоднокатаных сталей перед горячекатаными видны в табл. 22 и рис. 40.

Таблица 22 **Основные характеристики кремнистых высоколегированных сталей**

Содержание кремния в стали, %	Характер прокатки стали	$\mu_н$	$\mu_м$	H_c, А/м
4	Горячекатаная	300–400	6000–8000	31–33
3,8	Холоднокатаная	600–900	20000–35000	9,5–14

* Холоднокатаные стали с анизотропной (ребровой) структурой.

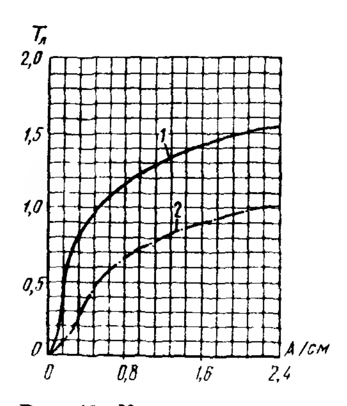


Рис. 40. Кривые намагничивания кремнистых сталей:
а – холоднокатаная сталь 3414, *б* – горячекатаная сталь 1511

Улучшенные магнитные характеристики у холоднокатаных сталей наблюдаются только при совпадении направления магнитного потока с направлением их прокатки. При другом направлении магнитного потока величины всех магнитных характеристик у холоднокатаных текстурованных сталей меньше, чем у горячекатаных. Поэтому наиболее рационально применять холоднокатаные стали в ленточных сердечниках и других конструкциях, где направление магнитного потока совпадает с направлением прокатки.

Электротехническая сталь прокатывается в листы и ленты толщиной от 0,05 до 1,5 мм и является доступным и дешевым материалом. Для сердечников электрических машин, имеющих круглую форму, применяют горячекатаные стали или холоднокатаные малотекстурованные. Последние обладают лучшими магнитными свойствами по сравнению с горячекатаными сталями.

§ 43. Металлические магнитно-твердые материалы

Магнитно-твердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов и других деталей. Первое требование, предъявляемое к постоянным магнитам, заключается в том, что они должны создавать в воздушном зазоре между своими полюсами магнитное поле с постоянными по величине напряженностью и магнитной индукцией. Постоянный магнит должен обладать большой магнитной энергией, т. е. магнитно-твердые материалы должны иметь возможно бóльшие коэрцитивную силу и остаточную магнитную индукцию.

У всякого постоянного магнита с течением времени уменьшается магнитный поток, а следовательно, и удельная магнитная энергия. Этот процесс называется *старением магнита*. Один вид старения наступает в результате вибраций, ударов, резкого изменения температуры магнита. Такому магниту можно возвратить прежние магнитные свойства

повторным намагничиванием. Другой вид старения связан с изменением структуры магнитно-твердого материала, поэтому является необратимым. Вторым требованием, предъявляемым к магнитно-твердым материалам, является устойчивость к старению.

Металлические магнитно-твердые материалы можно разделить на три основные группы: мартенситные высокоуглеродистые стали; сплавы на основе железа – алюминия – никеля; металлокерамические.

Мартенситные стали. Мартенситная структура в высокоуглеродистых сталях получается посредством их закалки – нагрева до температуры, при которой сталь представляет собой раствор углерода в железе (аустенит), и последующего резкого охлаждения в воде или масле. При мартенситной структуре кристаллы железа резко искажаются – вытягиваются в длину, а оставшаяся часть раствора углерода вызывает внутренние напряжения. Все это обеспечивает магнитную твердость постоянным магнитам, изготовленным из мартенситных сталей.

В качестве мартенситных сталей применяют хромистые, вольфрамовые и кобальтовые. В хромистые стали в качестве легирующего компонента вводят хром (1,3 – 3,6 %), в вольфрамовые – вольфрам (5,5 – 6,5 %) и хром (0,3 – 0,5 %), в кобальтовые стали – кобальт (5 – 17 %), молибден (1,2 – 1,7 %) и хром (6 – 10 %). Все эти стали содержат (0,9 – 1,1 %) углерода, остальное – железо.

Постоянные магниты изготовляют из стальных прутков и полос мартенситных сталей горячей ковкой или штамповкой. После механической обработки их закаливают на мартенсит, а затем намагничивают. Для стабилизации магнитных характеристик все магниты подвергают искусственному старению.

Основные магнитные характеристики стальных магнитов: хромистых $B_r = 0{,}90$ Тл; $H_c = 4400$ А/м; вольфрамовых $B_r = 1$ Тл; $H_c = 4800$ А/м; кобальтовых $B_r = 0{,}8 \div 0{,}9$ Тл; $H_c = 11\,000 \div 13\,500$ А/м. Лучшими материалами являются кобальтовые стали, но они значительно дороже хромистых и вольфрамовых. Все стали находят ограниченное применение ввиду невысокого уровня их магнитных характеристик.

Железо – никель – алюминиевые сплавы. Сплавы этого состава, легированные кобальтом, титаном или ниобием, подвергнутые особой термической обработке, обладают высоким уровнем магнитных характеристик: $B_r = 0{,}5 \div 1{,}40$ Тл; $H_c = (42 \div 200) \cdot 10^3$ А/м. Эти сплавы обозначаются марками: ЮНД8, ЮНДК15, ЮН13ДК24, ЮНДК34ТБ, ЮНДК35Т5

и др.* Буквы обозначают компоненты, входящие в состав сплавов на основе железа: Ю – алюминий, Н – никель, Д – медь, К – кобальт, Т – титан, Б – ниобий. Постоянные магниты из этих нековких сплавов можно получать только методом литья с последующей обработкой их шлифованием.

Высокий уровень характеристик магнитной твердости магнитов из этих сплавов достигается специальной термообработкой, заключающейся в следующем. Вначале производят нагрев магнитов до температуры 900 – 1200 °С с последующим охлаждением на воздухе или в воде. При этом все составные части сплава (алюминий, никель и др.) будут растворены в железе, образуя пересыщенный раствор. С течением времени растворенные в железе компоненты сплава начинают выпадать в виде мелкодисперсных частиц. Последние вызывают внутренние напряжения в кристаллах железа, что обеспечивает материалу высокий уровень магнитной твердости. Чтобы ускорить этот процесс, производят отпуск закаленного магнита, т. е. его нагревают до температуры 500 – 650 °С, при которой начинают выпадать растворенные в железе компоненты. При этом соблюдают критическую скорость охлаждения: 15 – 20 °С в секунду. Описанный процесс тепловой обработки магнитов из этих сплавов, называемый *дисперсионным твердением*, состоит из двух этапов – закалки и отпуска.**

Уровень магнитных характеристик у сплавов с содержанием кобальта от 15 % и выше можно повысить посредством термомагнитной обработки отлитых магнитов. Для этого магнит нагревают до 1300 °С и охлаждают в сильном магнитном поле со скоростью 10 – 15 °С в секунду. Вследствие ориентации магнитных доменов в направлении действия внешнего магнитного поля, охлажденные магниты приобретают магнитную текстуру. В результате этого их магнитная энергия возрастает в среднем на 60 – 80 % за счет резкого увеличения остаточной магнитной индукции. После закалки магнитов во внешнем магнитном поле их подвергают отпуску, т. е. повторному нагреву до 600 °С и охлаждению с оптимальной скоростью (15 – 20 °С/с).

Магниты из этих сплавов значительно более стойки к старению, чем мартенситные стали. Недостатком этих сплавов является то, что они не поддаются обычным ме-

---

* Подробней см. Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. Высшая школа, 1982.

** Точный режим термической обработки магнитов определяется составом сплава.

тодам механической обработки вследствие большой твердости и хрупкости. Магниты из этих сплавов можно обрабатывать только шлифованием.

Нековкие металлокерамические материалы. Магниты очень малых размеров или сложной формы в массовом производстве стараются изготовлять из металлокерамических материалов. Эти материалы получают из металлических порошков, которые берут в соотношениях, обеспечивающих магнитную твердость магнитам после их прессования и последующего спекания при высоких температурах. Металлокерамические магниты изготовляют на основе порошков из сплавов: железо – никель – алюминий или железо – никель – алюминий – кобальт. Чистые металлы или их сплавы измельчают до частиц размером 10–75 мкм. Из порошкообразной исходной массы магниты прессуют при давлениях $(10-15) \cdot 10^5$ Н/м^2. Отпрессованные магниты спекают в защитной атмосфере или вакууме при 1100–1300 °С. Спеченные магниты закаливают, а затем производят отпуск, охлаждая их с заданной скоростью. Магниты, в состав которых входит кобальт, подвергают термомагнитной обработке под действием внешнего магнитного поля. Это заметно улучшает их магнитные характеристики (B_r и H_c).

Металлокерамические магниты в готовом виде имеют небольшую пористость (2–5 %), которая несколько снижает их магнитные характеристики. Достоинствами металлокерамических магнитов являются чистота их поверхности, не требующая дополнительной обработки, и точность заданных размеров. Магниты из металлокерамических материалов могут обрабатываться только шлифованием.

§ 44. Ферриты

Ферриты изготовляют из порошкообразной смеси, состоящей из оксида железа и специально подобранных оксидов других металлов. Отпрессованные ферритовые изделия подвергают спеканию при высоких температурах. Название феррита определяется названием двухвалентного или (реже) одновалентного металла, окисел которого входит в состав феррита. Так, если в состав феррита входит оксид цинка ZnO, то феррит называется ферритом цинка, если оксид никеля NiO – ферритом никеля и т. д.

Ферриты, в состав которых кроме оксида железа Fe_2O_3 входит только один оксид другого металла, называются *простыми*. Химическая формула простого феррита в общем виде записывается так: $MeOFe_2O_3$ или $MeFe_2O_4$, Me – обо-

значение металла, оксид которого входит в состав феррита.

Не все простые ферриты обладают магнитными свойствами. Так, ферриты цинка $ZnFe_2O_4$ и кадмия $CdFe_2O_4$ являются немагнитными веществами. Наличие или отсутствие магнитных свойств у простых ферритов определяется их кристаллической структурой.

Наилучшими магнитными характеристиками обладают сложные или смешанные ферриты, представляющие собой твердые растворы одного простого феррита в другом. В этом случае могут быть использованы немагнитные ферриты в сочетании с магнитными простыми ферритами. Например, твердый раствор двух простых ферритов цинка и никеля образует смешанный никель-цинковый феррит. Химическая формула этого феррита: $Ni_xZn_{(1-x)}Fe_2O_4$.

В приведенной формуле x обозначает молярную долю* содержания в этом материале оксида никеля, а $(1-x)$ – молярную долю оксида цинка, причем сумма этих долей равна единице.

Ферриты изготовляют по керамической технологии, т. е. исходные порошкообразные оксиды металлов, взятые в определенном соотношении, измельчают в шаровых мельницах. Из этой смеси тонкопомолотых порошков прессуют брикеты, которые подвергают первоначальному обжигу в печах. Спекшиеся брикеты размалывают и в полученный тонкодисперсный порошок вводят какой-либо пластификатор, например раствор поливинилового спирта. Из полученной массы прессуют ферритовые изделия – сердечники, кольца, которые обжигают при 1000–1400 °С. Полученные твердые хрупкие изделия – преимущественно черного цвета; их можно обрабатывать только шлифованием. В качестве магнитно-мягких материалов широко применяют смешанные магнитно-мягкие ферриты: никель-цинковые, марганец-цинковые, литий-цинковые. Условные обозначения ферритов: НН – никель-цинковые низкочастотные ферриты, НМ – марганец-цинковые, ВТ – ферриты с прямоугольной гистерезисной петлей. Цифры, стоящие впереди буквенных обозначений, представляют собой среднее значение начальной магнитной проницаемости. Например: 4000НМ – марганец-цинковый феррит с начальной проницаемостью, равной 4000.

Основные характеристики ферритов следующие: плотность 3800–5000 кг/м^3. ТКЛР – $(5 \div 12) \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Магнитные и электрические характеристики ферритов у никель-цинковых:

---

* Молярная доля – количество данного оксида, (кг), соответствующее его молекулярной массе.

$\mu_н = 35 \div 2400$; $\mu_м = 520 \div 7000$; $H_c = 9 \div 54$ А/м; $B_r = 0{,}06 \div 0{,}78$ Тл; $\rho = 10^2 \div 10^8$ Ом·м; у марганец-цинковых: $\mu_н = 550 \div 8000$; $\mu_м = 2000 \div 10\,000$; $H_c = 0{,}06 \div 0{,}96$ А/м; $\rho = 10^{-1} \div 10^2$ Ом·м; $B_r = 0{,}03 \div 0{,}14$ Тл.

Достоинством ферритов являются стабильность магнитных характеристик в широком диапазоне частот, малые потери на вихревые токи и простота изготовления ферритовых деталей. Как все магнитные материалы, ферриты сохраняют свои магнитные свойства только до температуры Кюри*. У различных по составу ферритов температура Кюри колеблется в широких пределах: от 70 до 950 °С. Все ферриты обладают небольшой пористостью (1—10 %).

Для изготовления постоянных магнитов используют магнитно-твердые ферриты, наибольшее применение из которых получили ферриты бария $BaO \cdot 6Fe_2O_3$. В отличие от магнитно-мягких ферритов бариевые ферриты имеют не кубическую, а гексагональную кристаллическую структуру. Последняя обусловливает магнитную твердость ферритов бария главным образом за счет большой коэрцитивной силы. По своей структуре ферриты бария представляют собой поликристаллические материалы, состоящие из множества кристаллических частиц. При этом кристаллические частицы ориентированы произвольно, что определяет одинаковость свойств феррита во всех направлениях. Эти ферриты — **изотропные** (марка БИ).

Если же в процессе прессования магнитов порошкообразную массу подвергнуть воздействию внешнего магнитного поля большой напряженности ($H \approx 800$ А/м), то кристаллические частицы будут ориентированы в одном направлении. Изготовленные таким образом бариевые магниты являются **анизотропными** (марка БА). Эти магниты в готовом виде, т. е. после обжига в печах и намагничивания, обладают более высоким уровнем магнитных характеристик (табл. 23). Как видно из таблицы, магниты, изготовленные из бариевых ферритов, обладают бóльшим удельным сопротивлением, что позволяет применять их и в области высоких частот. Для лучшего использования бариевым магнитам придают форму, при которой их длина мала по сравнению с сечением.

Бариевые ферриты отличаются стабильностью своих характеристик, но чувствительны к резкому изменению температуры. Их изготовляют из недефицитных порошкообразных

* Предельная температура, до которой магнитные материалы сохраняют свои магнитные свойства.

Таблица 23. **Основные характеристики бариевых ферритов**

Обозначение феррита	Плотность, г/см^3	Коэрцитивная сила, А/м	Остаточная магнитная индукция, Тл	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Температура Кюри, °С
1БИ1	4,5	$(128 \div 144) \cdot 10^3$	0,2–0,22	10^3	450
2БА1	5,0	$(185 \div 212) \cdot 10^3$	0,3–0,35	10^3	450

материалов (оксида железа Fe_2O_3 и углекислого бария $BaCO_3$) методами керамической технологии. Магниты из бариевых ферритов значительно дешевле магнитов из железо – никель – алюминиевых сплавов и других металлических материалов.

Недостатками всех ферритов являются хрупкость и возможность обработки только шлифованием. Ферриты являются магнитными полупроводниками и, следовательно, с ростом температуры их удельное сопротивление уменьшается, что вызывает увеличение потерь на вихревые токи.

Контрольные вопросы

1. Перечислите магнитные характеристики, по которым оцениваются магнитные свойства материалов.
2. На какие основные группы делятся магнитные материалы и какие характерные особенности имеет каждая группа?
3. Какие требования предъявляют к магнитно-мягким и магнитно-твердым материалам?
4. Что представляют собой пермаллои и каковы их магнитные характеристики?
5. Что представляют собой электротехнические стали и где их применяют?
6. Что представляют собой текстурованные электротехнические стали с ребровой структурой и каковы их характерные свойства?
7. Перечислите магнитно-твердые металлические материалы и приведите их примерный состав.
8. Что представляют собой металлокерамические материалы и где они применяются?
9. Что представляют собой ферриты и на какие основные группы они делятся?
10. Перечислите характерные свойства ферритов.

ГЛАВА VII. СВЕРХПРОВОДНИКИ И КРИОПРОВОДНИКИ

§ 45. Основные свойства сверхпроводников

Из предыдущего известно, что электрическое сопротивление любого металлического проводника уменьшается с понижением его температуры. У некоторых металлов и сплавов помимо такого нормального уменьшения электрического сопротивления при их охлаждении наблюдается новое свойство: при температуре от 10 К (−263 °С) и ниже электрическое сопротивление у некоторых металлов и сплавов резко падает до нуля. Это явление называется *сверхпроводимостью*, а материалы, у которых наблюдается это явление, называют *сверхпроводниками*. Температура, при которой совершается переход материала в сверхпроводящее состояние, называется *критической температурой* $T_{кр}$ сверхпроводникового перехода.

Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 г. голландским ученым Камерглинг-Оннесом, который исследовал электрическое сопротивление ртути при низких температурах. При этом было установлено, что при температуре 4,2 К* (−268,8 °С) электрическое сопротивление ртути резко снизилось практически до нуля и его невозможно было измерить. Если взять замкнутую цепь (кольцо) из металла в сверхпроводящем состоянии при критической температуре $T_{кр}$ и возбудить в этой цепи ток, то он будет циркулировать в ней бесконечно долго. К настоящему времени обнаружено 27 сверхпроводников в виде чистых металлов: алюминий, свинец, теллур, ниобий, цинк, молибден и другие и более тысячи сплавов металлов. Основные сверхпроводниковые материалы представлены в табл. 24.

Следует отметить, что такие проводники электрического тока, как серебро, медь и золото, не обладают свойством сверхпроводимости. Свойством сверхпроводимости не обладают и ферромагнитные материалы: железо, никель, кобальт и их сплавы.

Как следует из таблицы, самой высокой критической температурой среди чистых металлов обладает ниобий (9,22 К), а самой низкой – иридий (0,14 К).

У сплавов критические температуры перехода в сверхпроводящее состояние значительно выше, чем у чистых метал-

* 4,2 К – температура кипения жидкого гелия (гелиевая температура).

Таблица 24. **Основные свойства некоторых сверхпроводников**

Материал	$T_{кр}$, К	$B_{кр}$, Тл
Алюминий	1,19	0,0099
Ванадий	5,3	0,1370
Галлий	1,09	0,0051
Иридий	0,14	0,0020
Кадмий	0,56	0,0030
Ниобий	9,22	0,1944
Олово – α	3,72	0,0309
Рений	1,7	0,0198
Титан	0,4	0,0100
Циик	0,91	0,0053
Цирконий	0,55	0,0047
Сплав 44 % ниобия + 56 % титана	8,7	–
Сплав 50 % ниобия + 50 % циркония	9,5	–
Сплав ниобия, алюминия и германия	20,7	–

лов. Так, у сплава, состоящего из ниобия, алюминия и германия, $T_{кр} = 20,7$ К ($-252,3$ °С).

Критическая температура сверхпроводников зависит от их химического состава, кристаллической структуры и других факторов.

Вторым характерным свойством сверхпроводников является то, что в эти материалы, находящиеся в состоянии сверхпроводимости, внешнее магнитное поле не проникает*. Следовательно, являясь материалами парамагнитными ($\mu = 1$), сверхпроводники становятся материалами диамагнитными, у которых $\mu = 0$ и магнитная индукция внутри сверхпроводника тоже становится равной нулю ($B = 0$). Таким образом, в момент перехода сверхпроводника в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле вытолкнется из него (рис. 41). При этом магнитная индукция в сверхпроводнике становится равной нулю.

Исследования показали, что при воздействии на многие сверхпроводники даже слабого внешнего магнитного поля их сверхпроводимость исчезает. Такие сверхпроводники называют *сверхпроводниками первого рода.* К ним относятся все сверхпроводящие чистые металлы, за исключением ниобия (Nb), ванадия (V) и технеция (Тс). В табл. 24 приведены критические значения магнитной индукции $B_{кр}$ при $T = 0$ К для чистых металлов. По достижении этих значений магнитной индукции сверхпроводимость этих металлов исчезает и они ведут себя как обычные проводники. Это ограничивает их применение.

* Эффект Мейснера.

Наряду со сверхпроводниками первого рода были открыты *сверхпроводники второго рода.* К ним относятся все сверхпроводящие сплавы и некоторые чистые металлы: ниобий (Nb), ванадий (V) и технеций (Tc). Сверхпроводники второго рода отличаются от сверхпроводников первого рода более высокими значениями критической температуры $T_{кр}$ и более высокими критическими значениями магнитной индукции $B_{кр}$. Кроме того, критический ток в сверхпроводниках второго рода может быть увеличен введением в эти сверхпроводники примесей, вызывающих изменение структуры сверхпроводников второго рода. Недостатком сверхпроводников второго рода является то, что они теряют свойство сверхпроводимости в определенном интервале напряженностей магнитного поля ($H_{кр1}$ $H_{кр2}$), воздействующего на сверхпроводник.

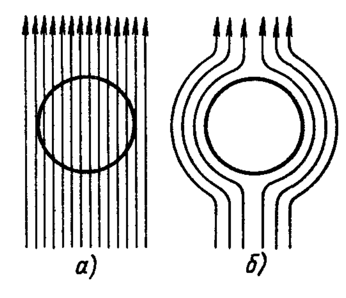


Рис. 41. Расположение силовых линий магнитного поля:
а – при наличии парамагнитного металла, *б* – при наличии сверхпроводника ($T < T_{кр}$)

Этот недостаток устранен в сверхпроводниках третьего рода, отличающихся от сверхпроводников второго рода составом и неоднородностью структуры. Это позволяет достигать в них очень больших критических значений тока (плотность тока выше 10^5 А/см^2) в сильных магнитных полях с индукцией (B) от 10 до 50 Тл.

Эти свойства сверхпроводников третьего рода открывают возможности их практического применения в электротехнике. К сверхпроводникам третьего рода относятся соединения ниобия с оловом ($NbSn_3$), ниобия с титаном (NbTi), ниобия с цирконием и титаном (NbZrTi) и др.

§ 46. Применение сверхпроводников

Одно из основных применений сверхпроводников – создание на их основе мощных сверхпроводящих соленоидов, которые позволяют получить магнитные поля с индукцией $B \approx 20$ Тл. Затраты энергии на охлаждение соленоида до температуры 4,2 К оказываются в 1000 раз меньшими по сравнению с

энергией, необходимой для питания током обычного электромагнита той же мощности.

Применение сверхпроводящих обмоток в электрических машинах и трансформаторах позволяет изготовлять их без стальных магнитопроводов и сердечников, так как индукция магнитных полей, создаваемых сверхпроводящими обмотками значительно превышает индукцию, создаваемую сердечниками из ферромагнитных материалов. Наряду с этим при наличии сверхпроводящих обмоток полностью устраняются тепловые потери. Перечисленные преимущества сверхпроводящих обмоток позволяют существенно уменьшить габариты и массу электрических машин и трансформаторов. Отмеченное ранее явление отталкивания двух сверхпроводников друг от друга (вследствие отталкивания их магнитных полей) позволяет создать опоры без трения и, следовательно, без потерь — в электрических машинах и в других механизмах.

Разработаны первые конструкции сверхпроводящих кабелей, которые позволяют в значительной степени увеличить передаваемые мощности без потерь энергии. Особенно большие работы проведены по разработке сверхпроводящих обмоточных проводов. Последние изготовляют из сплавов типа твердых растворов на основе ниобия и циркония (NbZr), на основе ниобия и титана (NbTi) или применяют трехкомпонентный сплав: ниобий — титан — цирконий (NbTiZr) как наиболее технологичный. Эти сверхпроводящие сплавы позволяют получить провода диаметром 0,2—0,4 мм и более.

Перечисленные сверхпроводящие материалы позволяют получать легко деформируемые провода. Наряду с перечисленными сплавами, представляющими собой твердые растворы металлов, находят также применение сплавы, представляющие собой интерметаллические соединения. Они отличаются высоким уровнем своих характеристик, т. е. более высокой критической температурой (18,2—20,2 К), большей критической индукцией магнитного поля (24,5 Тл при 4,2 К) и большей допустимой плотностью тока (до $2 \cdot 10^6$ А/см^2). Из этих сплавов нашли применение: станнид ниобия ($NbSn_3$) и германид ванадия (V_3Ge).

Недостатком этих и других интерметаллических соединений является их хрупкость и трудность получения из них проводов. Изготовленные из этих проводов обмотки не допускают дальнейших деформаций.

Обмоточные провода из сверхпроводящих сплавов выпускаются с эмаль-лаковой изоляцией на основе полиамидов, с изоляцией в виде монолитного слоя фторопласта, а также с изоляцией из нитей и пленок лавсана и других полимеров.

§ 47. Основные свойства криопроводников и их применение

Криопроводники, или гиперпроводники, это металлы, обладающие весьма низкими значениями электрического сопротивления при низких температурах, но выше критических температур сверхпроводников. Это температуры жидкого водорода (20,4 К), жидкого неона (27,3 К) и жидкого азота (77,4 К), при которых электрическое сопротивление этих материалов резко уменьшается. Это объясняется резким снижением интенсивности колебаний кристаллической решетки, что уменьшает рассеяние электронов, составляющих ток в металлических проводниках.

Степень рассеяния электронов в этом случае будет определяться только частицами примесей, содержащихся в металлическом криопроводнике. Поэтому в качестве криопроводников применяют проводниковые металлы высокой химической чистоты. К ним относятся особо чистые медь ($Cu \geqslant 99,99\%$), алюминий ($Al \leqslant 99,999\%$), серебро ($Ag \leqslant 99,99\%$) и бериллий ($Be \leqslant 99,95\%$). Эти криопроводники применяют в отожженном (мягком) состоянии, что повышает их проводимость. Обмотки электрических машин, трансформаторов и электрических аппаратов, изготовленные из криопроводников и работающие при криогенных температурах, допускают большие плотности тока и обладают значительно меньшими потерями. Это делает возможным значительно уменьшить габариты и массу электрических машин и аппаратов (в криогенном исполнении) и существенно повысить их кпд.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства сверхпроводников.
2. Что понимают под критической температурой сверхпроводникового перехода?
3. На какие группы делят сверхпроводниковые материалы?
4. Что представляют собой криопроводники?

ГЛАВА VIII. ПРИПОИ, ФЛЮСЫ И КЛЕИ

§ 48. Припои и флюсы

Припои представляют собой чистые металлы или сплавы, применяемые в качестве связующего вещества при пайке металлических частей. Всякий припой должен выбираться с таким расчетом, чтобы он имел температуру плавления значительно

ниже, чем соединяемые им металлические части. Припои делятся на легкоплавкие и тугоплавкие.

Легкоплавкие, или мягкие, припои имеют температуру плавления ниже 500 °С, а тугоплавкие, или твердые, выше 500° С.

В марках припоев буквы и цифры обозначают следующее: буква П, расположенная на первом месте, – припой; стоящие за ней буквы обозначают следующее: О – олово, Су – сурьма, С – свинец, А – алюминий, Ср – серебро, М – медь, Кр – кремний, Ви – висмут, Зл – золото, К – кадмий. Цифры, располагающиеся за буквами, указывают процент содержания массы основного металла в припое. Например ПОС-90: припой оловянно-свинцовый с содержанием олова 90 % (по массе); ПОСК-50-18 содержит олова – 50 %, кадмия – 18 %, свинца – остальное (по массе).

Наиболее широко применяют оловянно-свинцовые припои. Они обладают большой жидкотекучестью и хорошо проникают в самые тонкие швы, хорошо схватываются с большинством металлов, медью, латунью, сталями, цинком и обеспечивают достаточно высокую прочность паяных швов. Припои с содержанием олова менее 15 % применяют для паяния деталей, где не требуется большая механическая прочность. Оловянно-свинцовые припои с большим содержанием висмута (50 – 57 %) обладают наиболее низкой температурой плавления (79 – 95 °С), но паяные ими швы хрупки.

В табл. 25 приводятся основные характеристики легкоплавких припоев.

К тугоплавким припоям относятся медно-цинковые (ПМЦ-54, ПМЦ-48 и др.) и медно-серебряные сплавы (ПСр-72, ПСр-70, ПСр-50 и др.), а также сплавы алюминия с медью цинком и кремнием. Наиболее широко применяются медно-серебряные припои. Они отличаются малым удельным электрическим сопротивлением и поэтому широко применяются для пайки токопроводящих частей из черных и цветных металлов, которые хорошо смачиваются этими припоями. При этом образуются механически прочные и коррозионно-стойкие паяные швы.

Припои на алюминиевой основе с добавками меди, кремния и олова отличаются повышенной механической прочностью и стойкостью к атмосферной коррозии. Эти припои применяются для пайки алюминиевых проводов и других деталей из алюминия и его сплавов.

Медно-цинковые припои обладают хрупкостью и не стойки к вибрациям и ударным нагрузкам, но электрическое сопротивление швов очень мало. Эти припои применяются для пайки деталей из меди, латуни, бронзы и сталей.

Таблица 25. **Легкоплавкие припои**

Марка припоя	Состав припоя, %, мас.	Температура плавления, °C	Разрушающее напряжение при растяжении, Н/м²	Область применения
—	Олово чистое	232	$5 \cdot 10^7$	Пайка и лужение меди, латуни и бронзы с образованием коррозионно-стойких швов и покрытий
ПОС-90	Олово 89–91 Свинец 11-9	220	$4,9 \cdot 10^7$	
ПОС-61	Олово 60–61 Свинец 40–39	190	$4,3 \cdot 10^7$	То же, но при более низкой температуре
ПОС-40	Олово 39–41 Свинец 61-59	238	$3,8 \cdot 10^7$	То же, но при повышенной температуре
ПОС-10	Олово 9–10 Свинец 91–90	299	$3,2 \cdot 10^7$	То же, но для пайки частей неответственного назначения
ПОССу40-2	Олово 39–41 Сурьма 2 Свинец – остальное	229	$4,3 \cdot 10^7$	Пайка и лужение медных проводов и частей из латуни и бронзы с образованием герметичных швов
П300	Цинк 60 Кадмий 40	300	$3,5 \cdot 10^7$	Пайка проводов и деталей из алюминия и алюминиевых сплавов.

В табл. 26 приводятся основные характеристики тугоплавких припоев.

Кроме припоя для пайки необходимы флюсующие вещества – флюсы. Их назначение заключается в очистке поверхности спаиваемых металлов от оксидов и других загрязнений и в предохранении поверхностей спаиваемых металлов от окисления в процессе пайки.

Флюсы могут представлять собой твердые порошкообразные вещества (бура, борная кислота, канифоль и др.) или жидкости (водный раствор хлористого цинка, спиртовый раствор канифоли и др.). Иногда применяют полужидкие флюсы-пасты.

Таблица 26. **Тугоплавкие припои**

Марка припоя	Состав припоя %, мас	Температура плавления, °C	Разрушающее напряжение при растяжении, Н/м²	Область применения
ПСр-72	Серебро 72 Медь 28	779	$36 \cdot 10^7$	Пайка токопроводящих деталей из меди, латуни, бронзы и других металлов, кроме алюминия
ПСр-70	Серебро 70 Медь 26 Цинк 4	775	$35 \cdot 10^7$	То же, но с большей стойкостью к коррозии
ПМЦ-54	Медь 54 Цинк 46	880	$26 \cdot 10^7$	Пайка деталей из меди, латуни, бронзы и стали с образованием хрупких швов
34-А	Алюминий 66 Медь 28 Кремний 6	525	$18 \cdot 10^7$	Пайка деталей из алюминия и его сплавов с образованием швов с повышенной механической прочностью

При пайке меди, латуни и бронз легкоплавкими припоями на свинцовой основе применяют флюсы, не вызывающие коррозии паяных швов. К таким флюсам относятся канифоль, раствор канифоли в этиловом спирте и другие составы на основе канифоли. Канифоль является слабоактивным флюсом, поэтому поверхности спаиваемых металлов должны быть тщательно защищены перед нанесением канифольного флюса.

При пайке тугоплавкими (твердыми) припоями, плавящимися при температуре выше 500 °C, канифоль и другие легко распадающиеся при высокой температуре флюсы применять нельзя. При высокотемпературной пайке стали, меди и медных сплавов (латуни, бронзы и др.) в качестве флюсов чаще всего используют буру $Na_2B_4O_7$ или смеси ее с борной кислотой H_3BO_3 и другими солями. Для пайки алюминия, легко окисляющегося на воздухе, применяют особо активные флюсы, могущие растворять плотную пленку оксидов на алюминии. К таким флюсам относится состав из хлористого лития, фтористого натрия, хлористого цинка и хлористого калия. Во всех случаях выбора флюса надо иметь в виду следующее: температура

Таблица 27. **Флюсы для пайки мягкими припоями**

Марка или название флюса	Состав, %, мас.	Общая характеристика и область применения
Канифоль светлая	Эфиры смоляных кислот	Для пайки токопроводящих частей из меди, латуни и бронзы
КЭ	Канифоль 25–30 Этиловый спирт 75–70	То же
ВТС	Вазелин 66 Триэтаноламин 6,5 Салициловая кислота 6,3 Этиловый спирт 21,2	Для пайки проводниковых изделий из меди, латуни, алюминия, бронзы, константана, манганина, серебра, платины и ее сплавов
ФА	Солянокислый анилин 1,8 Глицерин 1,5 Канифоль 96,7	То же, более активизированный флюс, хорошо очищающий поверхности соединяемых металлов
ФП	Канифоль 16 Хлористый циик 4 Вазелин 80	Для пайки изделий из черных и цветных металлов с образованием швов повышенной прочности (но требуется последующая промывка водой)

Таблица 28. **Флюсы для пайки твердыми припоями**

Состав, %, мас.	Общая характеристика и область применения
Прокаленная бура	Для пайки изделий из меди, бронзы, платины, никеля и сталей (медными и медно-цинковыми припоями). Остатки флюса должны удаляться во избежание коррозии
Плавленая бура 21 Борная кислота 70 Фтористый кальций 9	Для пайки изделий из меди, латуни, бронзы, нержавеющей и углеродистой стали (медными припоями)
Борный ангидрид 36 Фтористый калий 42 Фтороборат калия 22	То же, но для пайки серебряными припоями
Фтористый натрий 10 Хлористый цинк 8 Хлористый литий 32 Хлористый калий 50	Для пайки деталей из алюминия и его сплавов (алюмииниевыми припоями). Остатки флюса должны удаляться во избежание коррозии

плавления твердого флюса должна быть ниже температуры плавления припоя, а температура пайки – ниже температуры термического разложения флюса. Во избежание коррозии паяных швов твердыми припоями остатки флюса должны быть удалены промывкой швов горячей водой с помощью щетки.

Состав и основные свойства некоторых флюсов приведены в табл. 27 и 28.

§ 49. Клеи и вяжущие составы

Клеи и вяжущие составы широко применяются в производстве электрических аппаратов приборов и других видов электрооборудования. От клеев и вяжущих составов не всегда требуются хорошие электроизоляционные свойства. Эти материалы, в первую очередь, должны обладать свойством склеивания – прилипания к металлическим и неметаллическим материалам (адгезией).

Склеивание каких-либо двух материалов происходит в результате сцепления пленки клея с поверхностями склеиваемых материалов. В результате химических реакций, протекающих в пленке клея, последняя превращается в твердое вещество, прочно соединяющее склеенные части. Сцепление пленки клея с поверхностью склеиваемых материалов возникает не только вследствие химических реакций, но также в результате появления межмолекулярных и электростатических сил между пленкой клея и поверхностями склеиваемых материалов.

На прочность клеевого шва оказывают влияние толщина и сплошность клеевой пленки, объемная усадка ее после склеивания, состав и структура склеиваемых материалов, а также степень подготовки склеиваемых поверхностей. Клей должен целиком заполнять зазор между склеиваемыми частями без воздушных включений. Толщина клеевой пленки не должна быть очень большой, но она должна обеспечивать непрерывность клеевого слоя на всей площади склеивания. Для обеспечения сплошной клеевой пленки оптимальной толщины и проникновения клея в поры склеиваемых поверхностей их нужно предварительно подогнать друг к другу и тщательно очистить от загрязнений с помощью растворителей. Для лучшего склеивания многие материалы (металлы, пластмассы) подвергают пескоструйной обработке или ошкуриванию для получения некоторой шероховатости склеиваемых поверхностей. Это обеспечивает повышение прочности клеевого шва. С этой же целью склеиваемые детали необходимо подвергать сжатию при определенных давлениях. Очень многие клеи для своего отверждения требуют нагрева до температуры 90–180 °С и выше.

Клеи составляют большую группу веществ. В электротехническом производстве применяют клеи на основе синтетических смол, обладающих наибольшей клеящей способностью. Многие из этих клеев обладают хорошими электроизоляционными свойствами. К таким клеям относятся глифталевые клеящие лаки, широко применяемые для склеивания листочков в производстве слюдяной слоистой изоляции. Сюда же относятся бакелитовые лаки, широко применяемые в производстве слоистых электроизоляционных пластмасс (гетинакс, текстолит и др.).

Большое применение получили клеи БФ, представляющие собой спиртовые растворы бутварно-фенольных смол. Эти клеи выпускаются трех марок: БФ-2, БФ-4 и БФ-6. Они отличаются друг от друга составом и имеют свои особенности, которые обусловливают области их применения. Так, клеи БФ-2 и БФ-4 применяют для склеивания металлов, пластмасс, стекол, керамики, слюды и древесины. Клей БФ-4 обеспечивает высокую сопротивляемость клеевого шва вибрациям. Клей БФ-6 образует эластичный клеевой шов и поэтому рекомендуется для склеивания резин и тканей друг с другом и для приклеивания их к металлам и пластмассам.

Клеи БФ наносят в два-три слоя на каждую склеиваемую поверхность. Время сушки каждого слоя при комнатной температуре составляет 1 ч, после чего наносят следующий слой клея, который подсушивается тоже в течение 1 ч. После этого склеиваемые детали соединяют друг с другом и слегка притирают. Затем их помещают под пресс или в струбцину, чтобы обеспечить давление $(4-12)\cdot 10^5$ Н/м^2.

Отвердевание клея происходит при температурах 140—150 °С (БФ-2 и БФ-4) и 90—100 °С (БФ-6) в течение 0,5—3 ч. Увеличение времени нагрева повышает прочность клеевого шва. Для выдержки клеевого шва при повышенных температурах склеиваемые детали помещают в термостат или применяют пресс с обогреваемыми плитами. Образующиеся при опрессовании соединяемых деталей подтеки клея удаляют шпателем (металлической лопаточкой) или тряпкой.

Клеевые швы, образуемые клеями БФ, стойки к воде, минеральным маслам, керосину, бензину и многим спиртам. Они не вызывают коррозии металлов и могут работать в интервале температур от —60 до +80 °В.

Широкое применение получили клеи на основе жидких и твердых эпоксидных смол. Как известно, эпоксидные смолы отличаются высокой адгезией к металлам, пластмассам, стеклам, керамике и другим материалам. Кроме того, эпоксидные смолы и клеи отличаются малой объемной усадкой при отвердевании, что повышает прочность клеевого шва. Эпоксид-

ные клеи могут отвердевать при температуре 20 °С и при повышенных температурах: 120 – 170 °С (клеи горячего отвердевания). Эпоксидные жидкие смолы необходимо подвергать вакуумной обработке при 50 – 70 °С с целью удаления из них воздушных включений, а затем смешивать с отвердителями.

Из эпоксидных клеев широко применяют клей на смолах ЭД-15, ЭД-16 и ЭД-20, представляющих собой жидкие сиропообразные массы, в которые вводят 15 – 20 % отвердителя – полиэтиленполиамина *. Исходные компоненты тщательно перемешивают. Приготовленный клей пригоден к применению в течение 2 – 6 ч, по истечении которых начинает сильно загустевать и постепенно превращаться в твердое вещество. Поэтому отвердитель (полиэтиленполиамин) необходимо вводить в смолу непосредственно перед применением клея. На предварительно подготовленные и очищенные поверхности наносят один слой клея, которому дают подсохнуть на воздухе в течение 15 – 30 мин. Затем склеиваемые поверхности соединяют друг с другом и сдавливают при давлении $(1 \div 2) \cdot 10^5$ Н/м^2. Отвердевание клеевого шва происходит при 20 °С в течение 18 ч. Для обеспечения более прочного клеевого шва необходима еще дополнительная обработка его при 100 °С в течение 4 ч.

Если в эпоксидиую смолу ввести другой отвердитель – малеиновый ангидрид, то получится клей горячего отвердения. В этом случае клеевой шов отвердевает при 120 С в течение 16 – 24 ч.

Чаще применяют ступенчатый режим отвердевания клеевого шва: 6 – 8 ч при 120 °С, затем 4 – 6 ч при 150 °С. В обоих случаях отвердевания клеевых швов соединяемые поверхности должны находиться под давлением $(0{,}5 \div 3) \cdot 10^5$ Н/м^2.

С целью повышения теплостойкости и снижения остаточных напряжений в клеевых швах в клеи вводят наполнители. пылевидный кварц, цемент и металлические порошки (серебра, меди и др.) **. Последние позволяют получить клеевые швы с большой проводимостью. Это необходимо при склеивании токопроводящих металлических деталей в электрических аппаратах и приборах.

Основной характеристикой клеев (перед их применением) является вязкость, которая должна доводиться до значений, предписываемых технологической инструкцией на данный клей. Для этого клеевую смесь приходится подогревать, а вязкость клея строго контролировать с помощью вискозиметров.

---

* Полиэтиленполиамин – жидкость, хорошо смешивающаяся с жидкой эпоксидной смолой.

** Клеи с введенными в них металлическими порошками называют контактолами.

Эпоксидные клеи могут также представлять собой порошки или прутки*. Порошкообразный клей наносят тонким слоем на предварительно нагретые поверхности (100–120 °С) склеиваемых металлических или пластмассовых деталей. При применении клея в виде прутка им натирают нагретые поверхности склеиваемых частей. В остальном технология склеивания не отличается от описанной ранее для жидких эпоксидных клеев. Отверждение клеевых швов происходит при давлении $(0{,}5-0{,}3)\times 10^5$ Н/м^2 и при температурах 120–200 °С в течение от 0,5 до 10 ч. Эпоксидные клеевые швы могут работать в интервале температур от −60 до +80 °С**. Следует отметить, что отвержденные эпоксидные клеевые швы и клеи БФ обладают хорошими электрическими характеристиками: $\rho_v = 10^{11} \div 10^{12}$ Ом · м, $E_{пр} = 10 \div 15$ МВ/м.

Отвержденные швы эпоксидных клеев стойки к влаге, бензину и смазочным маслам. При использовании эпоксидных клеев следует учитывать их токсичность, что требует соблюдения мер по технике безопасности.

Кроме клеев в электротехническом производстве и на монтажах широко применяют вяжущие составы (связки). Они представляют собой тестообразные текучие массы, которые с течением времени затвердевают. В отличие от клеев эти составы применяют не для склеивания, а для заделки (крепления) металлической арматуры на изоляторах, например фланцев на проходных и опорных изоляторах, для наклейки чугунных шапок на подвесные изоляторы, а также для закрепления в головках подвесных и штыревых изоляторов металлических стержней.

Для армирования изоляторов нашли наибольшее применение цементно-песчаные вяжущие составы. Они состоят из 2–3 частей высококачественного портландцемента (марки 500 или 600) и одной части промытого кварцевого песка. Портландцемент представляет собой тонкомолотый цементный клинкер, получаемый в результате обжига смеси исходных материалов, содержащих известь и глину, или цементных природных мергелей (природных глинистых известняков).

В состав цемента вводят также гидравлические добавки (до 15 %) в виде гранулированного доменного шлака и других минеральных веществ, способствующих увеличению механической прочности отвердевшего цемента (цементного камня). Наряду с гидравлическими добавками в цемент добавляют

* Порошкообразный клей («Эпоксид П»); клей в виде прутков («Эпоксид ПР» и др.).

** Некоторые эпоксидные отвержденные клеи могут работать в интервале температур от −120 до +100 °С (ВК-1 и др.).

инертные породы. Плотность портландцемента составляет 3000–3200 кг/м³. Он имеет большое преимущество перед другими цементами – способность соединяться со сталью и чугуном без какого-либо вредного воздействия на них. Качество портландцемента определяется его химическим составом, режимом обжига исходных материалов и тониной помола исходных компонентов.

Важнейшими характеристиками цемента являются скорость схватывания и скорость твердения.

Схватывание цемента – это превращение цементного теста в непластичную твердую массу. Твердение цемента – это процесс нарастания его механической прочности во времени. Твердение цемента может происходить на воздухе и в воде.

Портландцементы отличаются сравнительно малыми скоростями схватывания и твердения: начало схватывания не раньше 45 мин, конец – не более 12 ч от начала затвердевания цемента. Интенсивное твердение, сопровождающееся нарастанием механической прочности, происходит в основном в течение первого месяца.

Скорости схватывания и твердения портландцемента зависят от температуры и влажности цемента, температуры воды, применяемой для затворения цемента, а также от температуры и влажности окружающего воздуха. Химический и гранулометрический составы портландцемента имеют также большое значение. У увлажненного цемента ухудшаются свойства схватывания и твердения, поэтому портландцемент может храниться не более трех месяцев и в сухом помещении. Смешивание цементов разных партий не допускается. Понижение температуры цементного теста тоже снижает свойства схватывания и твердения цемента.

В зависимости от механической прочности образцов* при сжатии (после 28 суток твердения их в воде) различают портландцементы четырех марок (табл. 29).

Таблица 29. **Механические характеристики цементов (после 28 сут. твердения в воде)**

Марка цемента	Разрушающее напряженне при сжатии, Н/м², не менее	Разрушающее напряжение при изгибе, Н/м², не менее
300	$300 \cdot 10^5$	$45 \cdot 10^5$
400	$400 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$
500	$500 \cdot 10^5$	$60 \cdot 10^5$
600	$600 \cdot 10^5$	$65 \cdot 10^5$

* Образцы представляют собой брусочки размером 40 × 40 × 160 мм. Для их изготовления берут цемент и кварцевый песок в соотношении 1 :3 (по массе).

Вторым компонентом вяжущих составов является кварцевый песок, являющийся инертным наполнителем в цементно-песчаных составах. Песок должен быть освобожден от глинистых загрязнений. Для этого его промывают водой в специальных устройствах, а затем сушат. Кроме того, песок должен иметь определенный гранулометрический состав, основную массу которого (96%) составляют частицы размером 0,15–0,2 мм

Применяемые цементно-песчаные смеси состоят из 75–80% портландцемента и соответственно из 25–20% кварцевого песка. Цемент и песок просеивают (отдельно) через вибрационное сито, затем тщательно перемешивают в специальных смесителях.

Для затворения цементно-песчаной смеси водой берут водопроводную воду в соотношении 16–18 мас. ч. на 100 мас. ч. сухой смеси. Такое соотношение сухих компонентов и воды обеспечивает необходимую текучесть цементно-песчаному раствору, например при армировании изоляторов, а также достаточную механическую прочность отвердевшего цементно-песчаного состава.

Портландцементы относятся к гидравлическим цементам, т. е. веществам, отвердевающим с наибольшей скоростью во влажной среде.

При твердении портландцемента в воде его объемная усадка ничтожно мала, так как создаются хорошие условия для протекания химических процессов под действием воды (гидролиз и гидратация) между веществами, входящими в состав цемента В результате этого происходит набухание зерен цемента и непрерывное уплотнение образовавшегося цементного камня, вследствие чего механическая прочность его возрастает. Однако твердение цемента в воде – процесс длительный. Для быстрого твердения цементных заделок применяют пропаривание цементно-песчаных швов в соединенных ими деталях, например, в армированных изоляторах *. Для этого изоляторы располагают на перфорированных полках в пропарочных камерах, куда непрерывно поступает пар с температурой 70–80 °С.

Цементно-песчаные составы должны обладать равномерным изменением объема. В случае применения цемента, неравномерно изменяющегося в объеме с течением времени, в особенности при поглощении влаги из воздуха, может разрушиться как сам цементный слой, так и арматура изолятора. Поэтому испытание цемента на равномерность изменения объема является обязательным.

---

* Изоляторы с закрепленными на них металлическими деталями (арматурой) на цементно-песчаном или другом составе.

Недостатком портландцемента является выделение из него с течением времени свободной извести, растворимой в воде. Это может привести к нарушению связи цементной заделки с электрокерамическим материалом и арматурой, т. е. к разрушению изолятора. Для защиты отвердевших цементных заделок от выщелачивания водой (свободной извести) цементные швы снаружи покрывают водостойкими лаками и эмалями. Это необходимо также для того, чтобы предотвратить проникновение влаги внутрь цементных заделок и смачивание компенсационных прокладок из кирзы или пробковой композиции, что приводит к снижению электрической прочности изоляторов.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой припои и для чего они предназначены?
2. Каково назначение флюсов?
3. Какими характерными свойствами обладают клеи?
4. Что представляют собой вяжущие составы и для чего они применяются?

ЛИТЕРАТУРА

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы.—М.: Энергия, 1977.

Васильев Н. П. Лабораторные работы по электроматериаловедению.— М.: Высшая школа, 1982.

Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы.— М.: Энергия, 1976.

Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям.— М.: Высшая школа, 1982.

Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы.— М.: Высшая школа, 1976.

Свалов Г. Г., Белый Д. И. Сверхпроводящие и криорезистивные обмоточные провода.— М.: Энергия, 1976.

Темкин И. В. Производство электроугольных изделий.— М.: Высшая школа, 1970.

Электрорадиоматериалы/Под ред Б. М. Тареева.— М.: Высшая школа, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава I. **Основные характеристики электротехнических материалов** 4

§ 1. Классификация и назначение электротехнических материалов 4
§ 2. Механические характеристики материалов 4
§ 3. Электрические характеристики материалов* 6
§ 4. Тепловые характеристики материалов 11
§ 5. Физико-химические характеристики материалов . . . 14

Глава II. **Электроизоляционные материалы** 16

§ 6. Газообразные диэлектрики 16
§ 7. Электрическая проводимость газообразных диэлектриков 18
§ 8. Пробой газообразных диэлектриков 19
§ 9. Общее понятие о жидких диэлектриках 23
§ 10. Нефтяные масла 23
§ 11. Синтетические жидкие диэлектрики 29
§ 12. Электрическая проводимость и пробой жидких диэлектриков 32
§ 13. Высокополимерные твердые материалы 33
§ 14. Твердые полимеризационные диэлектрики 34
§ 15. Твердые поликонденсационные диэлектрики 42
§ 16. Нагревостойкие высокополимерные диэлектрики . . 46
§ 17 Электроизоляционные резины 51
§ 18. Лаки и эмали 53
§ 19. Компаунды 59
§ 20. Бумаги и картоны 63
§ 21. Лакоткани, ленты и лакированные трубки 69
§ 22. Пластические массы 73
§ 23. Слоистые пластмассы 76
§ 24. Слюдяные материалы 79
§ 25. Слюдинитовые и слюдопластовые материалы . . . 86
§ 26. Электрокерамические материалы 88
§ 27. Силикатные (неорганические) стекла 95
§ 28. Минеральные диэлектрики 97
§ 29. Электрическая проводимость и пробой твердых диэлектриков 99

Глава III. **Проводниковые материалы** 101

§ 30. Проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением 101

§ 31. Проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением* 107
§ 32. Жаростойкие проводниковые материалы 108
§ 33. Металлокерамические материалы и изделия 110
§ 34. Электроугольные изделия 112

Глава IV. **Проводниковые (кабельные) изделия** 115

§ 35. Обмоточные провода 115
§ 36. Монтажные провода и кабели 119
§ 37. Установочные провода 120

Глава V. **Полупроводниковые материалы** 122
§ 38. Основные свойства 122
§ 39. Полупроводниковые материалы 133

Глава VI. **Магнитные материалы** 136

§ 40. Основные характеристики 136
§ 41. Классификация магнитных материалов 140
§ 42. Металлические магнитно-мягкие материалы 141
§ 43. Металлические магнитно-твердые материалы 144
§ 44. Ферриты 147

Глава VII. **Сверхпроводники и криопроводники** 151
§ 45. Основные свойства сверхпроводников 151
§ 46. Применение сверхпроводников 153
§ 47. Основные свойства криопроводников и их применение 155

Глава VIII. **Припои, флюсы и клеи** 155
§ 48. Припои и флюсы 155
§ 49. Клеи и вяжущие составы 160

Литература 167

Приложение 1

Основные характеристики слюдинитовых электроизоляционных материалов

Материал *	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики *при* 20 °С		Область применения
			электрическая прочность (не менее), мВ/м	удельное объемное сопротивление, Ом м	
Слюдинит коллекторный	КСШ	0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,70 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,0; 1,05; 1,10; 1,20	32 – 34 28 – 29	10^{10} – 10^{11} 10^{10} – 10^{11}	Электроизоляционные прокладки между пластинами в коллекторах электрических машин. Нагревостойкость 130 °С
Стеклослюдинит формовочный нагревостойкий	ФСКН-1 ФСКН-2	0,10; 0,12 0,10; 0,12; 0,15	33 – 38 28 – 33	10^{11} 10^{11}	Пазовая изоляция и изоляционные прокладки в электрических машинах и аппаратах. Нагревостойкость 200 – 300 °С
Слюдинит гибкий	ГСП; ГСП-ПЛ-10 ГСП-ПЛ-20 ГСП-ПЛ-50 $Г_1$СП; $Г_2$СП	0,15; 0,20; 0,25 0,25; 0,3 0,10 – 0,3	1,6 – 4,2** 5,0** 6 – 7** 1,4 – 6,6**	10^{10}	То же, но нагревостойкость 130 °С
	$Г_1$СК; $Г_2$СК	0,10; 0,15; 0,25; 0,30	То же	10^{11}	То же, но нагревостойкость 155 °С
	$Г_1$СКМ $Г_1$СКН	0,10; 0,12; 0,15 0,20; 0,25; 0,30	1,3 – 1,5** 4,2 – 6,3	10^{12}	То же, но нагревостойкость до 300 °С

Слюдинитофолий	СБЦ-Г	0,10; 0,12; 0,15	1,5 – 2,5**	10^{11}	Изоляция полюсов, роторных стержией и др. Нагревостойкость 130 °С
Слюдинитовая лента непропитанная	ЛС25-ТТ; ЛС25-ТТ-УП-2,5 ЛС25-СТ ЛС25-СТ-УП-2,5	0,11 0,09	10 – 11	10^{10}	Изоляция стержней статоров и роторов в электрических машинах высокого напряжения с нагревостойкостью 130 и 155 °С в зависимости от пропиточного состава
	ЛС25-ТБл ЛС25-ТБл-УП-2,5 ЛС25-ТБм ЛС25-ТБм-УП-2,5	0,11 0,09	10 – 11	10^{10}	
	ЛС25-ТП; ЛС25-ТП-УП-2,5 ЛС40-ТТ; ЛС40-ТТ-УП-2,5	0,9 0,13	15 – 20	10^{11}	
	ЛС40-СТ-УП-2,5 ЛС40-ТБм ЛС40-ТБм-УП-2,5	0,15 0,13	10 – 11	10^{10}	
	ЛС40-ТП; ЛС40-ТБм-УП-2,5 ЛС40-ТП ЛС40-ТП-УП-2,5 ЛС40-СП ЛС40-СП-УП-2,5	0,11 0,1 0,13	18 – 20	10^{11}	
Слюдинитовая лента	ЛСК-ТТ; ЛСК-СС	0,15; 0,17	1,0 – 1,2**	$10^{10} – 10^{11}$	Область применения та же, что и непропитанных лент, но в

Материал *	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики при 20 °С		Область применения
			электрическая прочность (не менее), мВ/м	удельное объемное сопротивление, Ом·м	
пропитанная	ЛС-ЭП-ТПЛ ЛС-ЭП-ТПлА	0,09; 0,10; 0,11; 0,13	3–3,2**		других видах изоляции электрических машин высокого напряжения
	ЛС-110-СПл	0,08; 0,09	1,2–1,4**	10^{10}–10^{11}	
	ЛСК-110-ТПл	0,10; 0,11	1,2–1,4		
	ЛСЭК-5-СПл ЛСЭК-5-ТПл	0,13; 0,15	1,0–1,2**	10^{12}	
	ЛСК-110-СТ ЛСК-110-ТТ	0,11; 0,13	1,0–1,2**		
	ЛСЭК-5-СТ ЛСЭК-5-ТТ	0,15; 0,17	1,0–1,2**	10^{12}	
	ЛСК-110-СТ ЛСК-110-ТТ	0,20; 0,25; 0,30	1,0–1,2**	10^{12}	
	ЛСК-110-БПл	0,08; 0,10; 0,13; 0,15	1,0–1,2**	10^{11}	
	ЛСЭП-934-СПл ЛСЭП-934-СПлА	0,11; 0,13	3,0–3,2**	10^{11}	

* Разрывная удельная нагрузка у непропитанных лент всех марок (за исключением ЛС40-СТ; ЛС40-ТТ) находится в пределах 60–120 Н/см, у ЛС40-СТ и ЛС40-ТТ от 190 до 240 Н/см; у пропитанных лент большинства марок 45-72 Н/см, у ЛСЭП-934-ТПлА (0,13), ЛСК-110-БПл и ЛСК-СС 100–145 Н/см, у ЛСК-Т (0,15–0,17) не менее 240 Н/см.

** Пробивное напряжение (кВ). Бóльшие значения относятся к лентам большей толщины.

Приложение 2

Основные характерстикв слюдопластовых электроизоляционных материалов

Материал*	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики при 20 °С		Область применения
			удельное объемное сопротивление, Ом · м	электрическая прочность, мВ/м	
Слюдопласт коллекторный	КИФШ, КИФШС	0,4; 0,5 0,6	$10^{10}-10^{11}$	16 – 22	Прессованный и калиброванный по толщине листовой материал. Нагревостойкость 130 °С
	КИФШ-1	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,4; 1,5	$10^{10}-10^{11}$	16 – 22	
	КИФП	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 и более	$10^{10}-10^{11}$	16 – 22	То же. Нагревостойкость 155 °С
Слюдопласт прокладочный	ПИФШ ПИФША	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0	$10^{11}-10^{12}$	18 – 20	Прессованный листовой материал, применяемый в виде электроизоляционных прокладок. Нагревостойкость 130 °С

Материал*	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики при 20 °С		Область применения
			удельное объемное сопротивление, Ом·м	электрическая прочность, мВ/м	
	ПИФТ	То же, но исключая 3,0; 5,0	$10^{11}-10^{12}$	18–20	То же. Нагревостойкость 180 °С
Слюдопласт гибкий	ГИФГ	0,2; 0,4; 0,3; 0,5	$10^{11}-10^{12}$	18–25	Изоляция роторных стержней, пазовая и междуфазовая изоляция. Нагревостойкость 130 °С
Слюдопластофолий	ИФГ-Б ИФГ-БП ИФГ ИФГ-П	0,15; 0,20; 0,30 0,15	10^{10} 10^{11}	5,5–23 6–25	Применяется для изоляции роторных стержней и др. Нагревостойкость 130 °С
Стеклослюдопласт композиционный*	ГИТ-ТС ГИП-ТС(В) ГИП-СС(В) ГИК-ТС(В) ГИК-СС(В)	0,25; 0,30 0,35; 0,40; 0,45	10^{11}	2,5–7,4**	Гибкий электроизоляционный материал. Нагревостойкость определяется составом связующего вещества: на триэтиленглифталевом лаке (ГИТ-ТС; ГИТ-Т-ЛСБ и др.) 130 °С; на полиэфирно-

	ГИТ-Т-ЛСБ ГИТ-С-ЛСБ ГИП-Т-ЛСБ(В) ГИП-Т-ЛСП(В)	0,45; 0,55	10^{11}	8,5 – 11,5**	эпоксидном (ГИП-ТС; ГИП-СС и др.) 155 °С; на кремнийорганическом (ГИС-СС; ГИК-ТС и др.) 180 °С
	ГИК-Т-ЛСК(В) ГИП-Т-С-ЛСП(В)	0,35; 0,43; 0,55 0,46	10^{12} 10^{11}	5 – 11,5** 8,7 – 10,7**	
	ГИП-ЛСБ-ЛСЛ(В); ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ(В); ГИК-ЛСК-ЛСЛ(В)	0,55	10^{11}	10,5 – 14,5**	
Слюдопластолента**	ЛИФЧ-ББ ЛИФГ-ББ	0,11 0,13	10^{11} 10^{10}	22 – 25** 18 – 19**	Применяется в качестве витковой и корпусной изоляции электрических машин. Нагревостойкость 130 °С

* Разрывная удельная нагрузка у слюдопластолент составляет 220 – 250 Н/см. У композиционного стеклослюдопласта находится в пределах 200 – 290 Н/см, у образцов, оклеенных с двух сторон стеклолакотканями (ГИП-ЛСБ-ЛСЛ, ГИК-ЛСК-ЛСЛ(В) и др.), – 290 390 Н/см

** Пробивные напряжения (кВ). Бо́льшие значения относятся к образцам с большей толщиной

Со всеми замечаниями и предложеииями просим обращаться по адресу: Москва, 101430, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Николай Васильевич Никулин

ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Зав. редакцией *Э. М. Концевая*
Редактор *М. И. Сорокина*
Мл. редактор *Л. Б. Успенская*
Художник *Ю. И. Артюхов*
Художественный редактор *Т. В. Панина*
Технический редактор *Ю. А. Хорева*
Корректор *Г. А. Чечеткина*

ИБ № 4575

Изд. № ЭГ-43. Сдано в набор 27.10.83. Подп. в печать 10.02.84. Т-06611. Формат 84 × $108^1/_{32}$. Бум. тип. № 1. Гарнитура Таймс. Печать высокая. Объем 9,24 усл. печ. л. 9.35 усл. кр.-отт. 9,75 уч.-изд. л. Тираж 180000 экз. Заказ № 1141. Цеиа 20 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производствеино-техническое объединение «Печатный Двор» имеии А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15